

# Analyse und Korrelation von Hagelschäden mit Wetterradardaten und Hagelabwehrmaßnahmen

## Diplomarbeit

vorgelegt von

**Wilfried Hertlein**

Institut für Hochfrequenztechnik  
Technische Universität Graz

Oktober 2011

Begutachter: Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Randeu Walter



## **Kurzfassung**

Seit den 1950er Jahren laufen weltweit Programme zur Hagelabwehr und zur Erhöhung von Niederschlagsmengen in Form von Regen oder Schnee. Obwohl bis heute kein eindeutiger, wissenschaftlicher Beweis für eine (positive oder negative) Beeinflussung des Wetters vorliegt, sprechen doch einige Indizien dafür. Die theoretischen Grundlagen zum Thema Hagelabwehr haben sich in den letzten Jahrzehnten wenig verändert, doch werden laufend weitere Erkenntnisse an allen Fronten zum Thema „Wetter-Beeinflussung“ erzielt. In der Steiermark wird seit dem Jahr 1955 aktiv Hagelabwehr betrieben. Auf über 2000 km<sup>2</sup> Schutzfläche wird mit Flugzeugen Silberjodid in potentiellen Hagelwolken ausgebracht. Eine wissenschaftlich fundierte Evaluierung des steirischen Hagelabwehr-Programms soll Aufschluss über dessen Wirksamkeit geben. Die vorliegende Arbeit basiert auf einer umfangreichen Literaturrecherche und beschäftigt sich von Grund auf mit der Materie der Hagelabwehr. Die wichtigsten Methoden zum Thema „Erkennen von Hagelzellen“ und „Evaluierung von Hagelabwehr-Projekten“ werden vorgestellt. Die Anwendbarkeit dieser Methoden für die Steiermark wird diskutiert, und es werden einige Möglichkeiten für eine zukünftige computergestützte Auswertung der Daten präsentiert.

## **Abstract**

Hail suppression projects and projects for the enhancement of precipitation have been conducted all over the world since the 1950s. The theoretical principles of weather-modification have been developed decades ago but are still valid and although there is still no scientific evidence of affecting the weather, there is a strong bias for a positive influence of seeding. In the lower parts of Styria (Austria) hail suppression is conducted on a scientific basis since 1955, when the “Steirische Hagelabwehrgenossenschaft” was founded. More than 2000 km<sup>2</sup> of agricultural and industrial ground are protected by seeding silver iodide from aircraft. A scientific evaluation of the hail suppression program is ought to show the effects of seeding. This work is based on extensive literature research. The most important theses related to the topics of “discrimination between hail- and rain-cells“ and “evaluation of hail suppression projects“ are shown. The applicability of the methods to the target area in Styria is discussed and some options for the development of a computer-based analysis-tool are given.

## **Eidesstattliche Erklärung**

*Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.*

---

Ort

---

Datum

---

Unterschrift

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Einführung in die Thematik der Hagelabwehr</b>	<b>3</b>
2.1	Geschichtlicher Überblick . . . . .	3
2.2	Hagelabwehr in der Steiermark . . . . .	4
2.3	Hagel . . . . .	6
2.3.1	Mikrophysikalische Prozesse in der Atmosphäre . . . . .	11
2.3.2	Dynamische Strukturen von Gewitterwolken . . . . .	12
2.4	Möglichkeiten zur aktiven Hagelabwehr . . . . .	12
2.4.1	Hypothesen zur Hagelunterdrückung . . . . .	13
2.5	Die Wirkung von Silberjodid . . . . .	16
2.6	Seeding . . . . .	17
<b>3</b>	<b>Vorhandene Daten und Datenquellen</b>	<b>21</b>
3.1	Radar und Radardaten . . . . .	21
3.1.1	Funktionsweise eines Wetterradars . . . . .	22
3.1.2	Das Wetterradar der Austro Control . . . . .	27
3.1.3	Das Radar auf der Reicherhöhe . . . . .	28
3.2	Positionsdatenerfassung der Flugzeuge . . . . .	28
3.3	Hageltestplatten . . . . .	29
3.4	Satellitenbilder . . . . .	31
3.5	Messungen in der Atmosphäre . . . . .	31
3.6	Blitzortungssystem ALDIS . . . . .	32
3.7	Weitere Quellen . . . . .	32
3.8	Weather Image Information System (WIIS) . . . . .	34
3.9	Fehlerquellen . . . . .	34

<b>4</b>	<b>Differenzierung zwischen Regen- und Hagelzellen</b>	<b>35</b>
4.1	Literaturrecherche . . . . .	36
4.2	CAPPI, maxPPI . . . . .	37
4.3	Das sowjetische Seeding-Kriterium (1967) . . . . .	37
4.4	Das Waldvogel-Kriterium (1979) . . . . .	38
4.5	Die Methode nach Auer (1994) . . . . .	39
4.6	Vertically Integrated Liquid Water Content - VIL (1972) . . . . .	40
4.7	Next Generation Weather Radar - NEXRAD . . . . .	41
4.8	Probability of Hail (POH) . . . . .	43
4.9	Diskussion . . . . .	44
<b>5</b>	<b>Evaluierung von Hagelabwehrprojekten</b>	<b>45</b>
5.1	Physikalische Evaluierung . . . . .	46
5.2	Statistische Evaluierung . . . . .	46
5.2.1	Randomisiert . . . . .	46
5.2.2	Control Area . . . . .	47
5.2.3	Versicherungsdaten . . . . .	48
5.3	Evaluierung nach Hsu und Changnon . . . . .	49
5.4	Auswertung von HTP nach Svabik . . . . .	50
5.5	Bodengeneratoren in Südwest-Frankreich (Dessens) . . . . .	51
5.6	Evaluierung nach Woodley und Rosenfeld (Texas) . . . . .	53
5.7	Die Abflussmenge von Gewässern (Silverman) . . . . .	53
5.8	Das griechische Hagelabwehrprojekt . . . . .	54
5.9	Numerische Modelle . . . . .	56
5.10	Diskrepanzen bei der Evaluierung . . . . .	56
5.10.1	Messunsicherheiten . . . . .	56
5.10.2	Unsicherheiten bei der Zellendefinition und Zellenverfolgung . . . . .	57
5.10.3	Unsicherheiten ob der Wirkstoff das Ziel erreicht . . . . .	57
5.11	Zusammenfassung der Methoden . . . . .	58

<b>6</b>	<b>Evaluierung der Hagelabwehr in der Steiermark</b>	<b>59</b>
6.1	Ein steirisches Seeding-Kriterium . . . . .	60
6.1.1	Die Methode nach Waldvogel . . . . .	62
6.1.2	Die Methode nach Auer . . . . .	64
6.2	Automatisierte Zellenverfolgung . . . . .	67
6.3	Zellen mit Seeding-Informationen überlagern . . . . .	70
6.4	Evaluierungsansätze . . . . .	70
6.4.1	Evaluierung mit Versicherungsdaten . . . . .	70
6.4.2	Evaluierung mit einem Vergleichsgebiet . . . . .	71
6.4.3	Evaluierungsansatz nach Dessens . . . . .	71
6.4.4	Betrachten der Niederschlagsmenge . . . . .	72
6.4.5	Ein Vorschlag: Methode der dynamischen Vergleichsgebiete . . . . .	73
6.4.6	Auswirkungen von AgJ auf das Seeding-Kriterium . . . . .	75
6.5	Diskussion der Evaluierungsansätze . . . . .	76
6.6	Steigerung der Effizienz der Hagelabwehr . . . . .	77
<b>7</b>	<b>Schlussbemerkung</b>	<b>78</b>
	<b>Anhang</b>	
<b>A</b>	<b>Radiosonden-Messwerte vom 13. 6. 2010</b>	<b>80</b>
<b>B</b>	<b>Zellenzuordnung zu Versicherungsmeldungen vom 13. 6. 2010</b>	<b>84</b>
<b>C</b>	<b>Verifizierung der Versicherungsmeldungen 2009</b>	<b>86</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>88</b>

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Historische Hagelkanonen am dritten internationalen Kongress zum Thema Wetter- schießen in Lyon 1901 und eine moderne Hagelkanone der Firma Eggers . . . . .	4
2.2	Die Mitgliedsgemeinden der Plattform Hagelabwehr Steiermark . . . . .	5
2.3	Konvektive Zellen über der Steiermark . . . . .	7
2.4	Auswirkungen verschiedener Hagelenergiewerte auf einzelne Kultureerträge . . . . .	8
2.5	Regionen mit erhöhtem Auftreten von Hagel . . . . .	10
2.6	Überblick über die Hagelabwehrkonzepte . . . . .	15
2.7	Möglichkeiten eine Wolke zu behandeln . . . . .	18
2.8	Bodengenerator . . . . .	19
2.9	Hagelabwehrrakete . . . . .	19
2.10	Hagelabwehr-Flugzeug der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft . . . . .	20
2.11	AgJ-Azeton-Brenner in Betrieb . . . . .	20
3.1	Prinzip eines Wetterradars mit Radarstrahl und Echozelle . . . . .	22
3.2	Quantisierungsstufen der Regenrate in $R$ bzw. $dBZ$ . . . . .	26
3.3	Das Radar am Zirbitzkogel . . . . .	27
3.4	Positionsdaten-Erfassung der Flugzeuge KGM und DDV . . . . .	29
3.5	Abbildung einer Hageltestplatte . . . . .	30
3.6	Position und Bezeichnung der Hageltestplatten im Raum Gleisdorf-Weiz . . . . .	30
3.7	Hagelmeldekarte der ZAMG . . . . .	33
4.1	Wahrscheinlichkeit eines Hagelereignisses nach Waldvogel . . . . .	39
4.2	Unterscheidung von Regen- und Hagelzellen nach Auer . . . . .	40
4.3	Hagelwahrscheinlichkeit bei NEXRAD . . . . .	42
4.4	Hagelwahrscheinlichkeit nach Wieringa und Holleman . . . . .	43
4.5	Betrachten einer Wettersituation von zwei unterschiedlichen Radar-Standorten . . . . .	44
5.1	Schutzgebiet mit einem gegen die Hauptwindrichtung vorgelagerten Kontrollgebiet . . . .	47

5.2	Schema der Methode nach Dessens . . . . .	52
5.3	Netz der Bodengeneratoren und HTP in Südwest-Frankreich . . . . .	52
6.1	Unterscheidung Regen- Hagelereignis nach Waldvogel (Zelle C) . . . . .	63
6.2	Unterscheidung Regen- Hagelereignis nach Waldvogel (Zelle G) . . . . .	63
6.3	Unterscheidung Regen- Hagelereignis anhand von $T_{top}$ und $Z_{3500}$ (Auer) . . . . .	66
6.4	Unterscheidung Regen- Hagelereignis anhand von $T_{top}$ und $Z_{max}$ (Auer) . . . . .	66
6.5	Zellendefinition mittels Radarbildern (a) . . . . .	69
6.6	Zellendefinition mittels Radarbildern (b) . . . . .	69
6.7	Anzahl der Hagelkörner abhängig von der AgJ-Menge . . . . .	72
6.8	Schematische Darstellung der Zugbahn einer konvektiven Zelle . . . . .	74
6.9	Verlauf des Waldvogel-Parameters in einer konvektiven Zelle . . . . .	76



# Tabellenverzeichnis

2.1	Hagel-Korngrößenklassifizierung nach TORRO . . . . .	9
2.2	Energiebeiträge von einem Korn einer Hagelkornklasse . . . . .	9
3.1	Z-R Beziehung: $Z = 200 \cdot R^{1,6}$ . . . . .	26
3.2	Quantisierung der Temperatur in °C bei der IR-Messung von Meteosat . . . . .	31
3.3	Zuordnung von Zellen zu getroffenen Gemeinden . . . . .	33
5.1	Auszug der Schadensmeldungen 2010 . . . . .	48
5.2	Simulationsergebnisse nach Hsu und Changnon . . . . .	49
5.3	Einteilung der Seeding-Perioden in 5-Jahresschritte nach Svabik . . . . .	51
5.4	Die Cloud-Seeding-Projekte der Sierra Nevada (Silverman) . . . . .	54
5.5	Parameter des griechischen Hagelabwehr-Programms . . . . .	55
6.1	Auswertung der Hageltestplatten 2007 (Auszug) . . . . .	65
6.2	Zu erwartender Hagel am Boden bei unterschiedlich trächtigen Zellen . . . . .	74
6.3	Zu erwartende Niederschlagsmenge am Boden bei unterschiedlich trächtigen Zellen . . . . .	74
6.4	Bewertung der Seeding-Einsätze . . . . .	77
A.1	Radiosonden-Messwerte vom 13. 6. 2010 . . . . .	82
B.1	Zellenzuordnung zu von Hagel getroffenen Gemeinden vom 13. 6. 2010 . . . . .	85
C.1	Verifizierung der Schadensmeldungen der Österreichischen Hagelversicherung 2009 . . . . .	87

# Kapitel 1

## Einleitung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Thema der aktiven Hagelabwehr in der Steiermark. Zwar existieren bereits einige Arbeiten zu diesem Thema, doch entwickeln sich die technischen Möglichkeiten laufend weiter, sodass durchaus eine Berechtigung für die neuerliche Befassung mit diesem Thema vorliegt. Die vorangegangenen Arbeiten versuchten großteils anhand von Fallbeispielen die Abläufe der Wolkenphysik aufzuzeigen und zu verstehen. Diese Arbeit basiert auf einer umfassenden Literaturrecherche und beschäftigt sich von Grund auf mit der Materie der Hagelabwehr. Es werden einige Möglichkeiten besprochen, um eine computergestützte Beurteilung der Hagelabwehr in der Steiermark vorzunehmen. Fallbeispiele werden untersucht, stehen aber nicht im Vordergrund dieser Arbeit. Momentan wird an der TU Graz eine umfangreiche Datenbank, mit verschiedenen meteorologischen Parametern, erstellt. Diese Daten sollen in Zukunft mit einem Auswerte-Programm untersucht werden, und es soll der Erfolg der Hagel-Abwehrmaßnahmen beurteilt werden. Diese Berechnungen werden hilfreich sein die Hagelabwehr in der Steiermark weiter zu entwickeln. Die theoretischen Grundlagen für die Erstellung des Auswerte-Programms werden in dieser Arbeit präsentiert.

Im ersten Kapitel wird gezeigt, wie Hagel entsteht. Man beschäftigt sich mit den historischen Versuchen des Menschen Hagel abzuwenden, und der heutige, wissenschaftliche Zugang zum Thema Hagelabwehr wird erläutert. Im zweiten Kapitel werden die meteorologisch-physikalischen Datenquellen und Messwerte vorgestellt. Anschließend findet eine umfangreiche Literaturrecherche statt und die wichtigsten Methoden zum Thema „Erkennen von Hagelzellen“ und „Evaluierung von Hagelabwehr-Projekten“ werden vorgestellt. Die Anwendbarkeit dieser Methoden für die Steiermark wird diskutiert, und zum Ende der Arbeit werden einige Möglichkeiten für eine zukünftige computergestützte Auswertung der Daten vorgestellt.

Seit den 1950er Jahren laufen weltweit Programme zur Hagelabwehr und zur Erhöhung von Niederschlag in Form von Regen oder Schnee, sowohl im Winter als auch im Sommer. Obwohl bis heute kein eindeutiger wissenschaftlicher Beweis für eine (positive oder negative) Beeinflussung des Wetters vorliegt, spricht doch einiges dafür. Die Theorie zum Thema Hagelabwehr hat sich in den letzten Jahrzehnten wenig verändert, doch werden laufend weitere Erkenntnisse an allen Fronten zum Thema „Wetter-Beeinflussung“ erzielt.

Grundsätzlich läuft aktive Hagelabwehr wie folgt ab:

- Gefahr erkennen (z.B. mit Radardaten)
- Wolke behandeln (mit einem bestimmten Wirkstoff „impfen“)
- Maßnahmen evaluieren (wurde der gewünschte Effekt erreicht?)

In der vorliegenden Arbeit werden weder das Seeding-Kriterium noch der operationelle Flugbetrieb der steirischen Hagelabwehrbetreiber beurteilt, vielmehr soll gezeigt werden, mit welchen Parametern unterschiedliche Wolken klassifiziert werden können. Wird eine Gewitterwolke über die Zeit verfolgt, so werden sich verschiedene Parameter verändern. Diese Parameter sollen bestimmt und in Zukunft mit einem Computerprogramm dokumentiert und ausgewertet werden. Die Theorie dazu wird in dieser Arbeit zusammengefasst. Werden Veränderungen dieser Parameter festgestellt, kann versucht werden einen Zusammenhang mit getroffenen Abwehrmaßnahmen zu finden. Die Frage lautet: „Welche Parameter einer Wolke haben sich immer dann verändert (und in welcher Weise), wenn die Wolke behandelt wurde?“

## Kapitel 2

# Einführung in die Hagelabwehr

Zu Beginn dieses Kapitels wird ein geschichtlicher Überblick zum Thema Hagel und dessen Bekämpfung durch die steirischen Hagelabwehrbetreiber gegeben. Es werden die meteorologischen Voraussetzungen für die Entstehung von Hagel aufgezeigt und es wird auf die mikrophysikalischen Prozesse in der Atmosphäre eingegangen. Anschließend werden die bekanntesten Hypothesen zur Hagelunterdrückung vorgestellt und es werden die Grundlagen erläutert die für das Verständnis einer aktiven Hagelabwehr nötig sind.

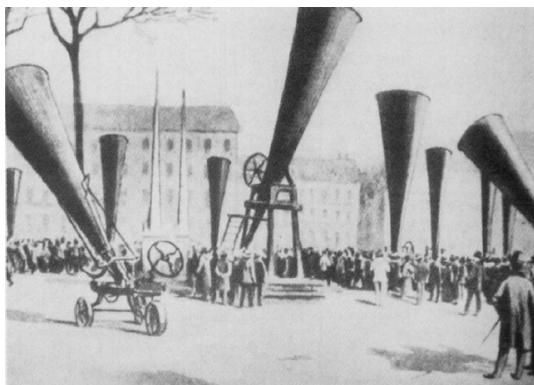
### 2.1 Geschichtlicher Überblick

Hagel tritt immer in Zusammenhang mit Gewittern<sup>1</sup> auf. Er kommt meist in kurzen Schauern und bedeckt oft nur einen kleinen Teil des von Niederschlag getroffenen Gebietes. Die plötzliche Verwüstung durch Hagel (möglicherweise in Verbindung mit Blitzschlag und starkem Wind) kann verheerende finanzielle und seelische Eindrücke hinterlassen. Es ist also nicht verwunderlich, dass seit jeher versucht wurde Hagel von Ernten und anderen Besitztümern fernzuhalten. Früher versuchten die Menschen mit Zaubersprüchen das Unheil abzuwenden, sie richteten Fäuste und Lanzen gegen den Himmel und schossen Pfeile himmelwärts, um herannahenden Hagel zu vertreiben. Die europäischen Christen versuchten durch Gebete und das Läuten von Kirchenglocken das Unwetter zu verhindern, wobei nicht klar ist, ob das Glockenläuten einen physikalischen Effekt hervorrufen sollte oder doch nur ein Bittgebet an Gott darstellte (vgl. ASCE). In Gegenden, wo keine Kirchen standen, wurden Wassertürme gebaut, um flächendeckend läuten zu können. Wie bereits erwähnt, ist nicht klar, ob das Glockenläuten einen physikalischen Hintergrund hatte, doch kam man bald auf die Idee, Schallwellen könnten Hagelwolken bekämpfen. Zum Wetterläuten gesellte sich das Wetterschießen. Von nun an wurde zusätzlich zum Glockenläuten versucht mit Böllern und Gewehren dem Hagel entgegenzuwirken. Berühmtheit erlangten die Hagelkanonen. Der österreichische Weinbauer Albert Stiger erfand diese 1896 und nachdem er zwei Jahre lang von Hagel verschont geblieben war, wurden diese zu tausenden in Österreich und Norditalien aufgestellt. Wenige

<sup>1</sup> Laut Deutschem Wetterdienst ist ein Gewitter eine meteorologische Erscheinung, die mit elektrischen Entladungen und Donner einhergeht. Wenn mindestens ein Donner zu hören ist, spricht man von einem Gewitter. Typisch für Gewitter sind Wolken mit einer großen vertikalen Ausdehnung (Cumulonimbus).

Jahre später waren die meisten von ihnen wieder verschwunden, doch vereinzelt kann man sie heute noch finden (Changnon und Ivens 1981). In leicht weiterentwickelter Form – aber immer noch nutzlos – werden Hagelkanonen sogar noch zum Kauf angeboten (Wieringa und Holleman 2006). In Italien wurden Raketen mit Sprengstoff in den Himmel geschossen. Die Explosion innerhalb der Wolke sollte eine noch bessere Wirkung zeigen. Wieder stellte sich heraus, dass diese Maßnahmen nutzlos sind, dennoch halten immer noch einige Personen an dieser Methode fest. In Italien sind drei Viertel derjenigen, die noch Raketen mit Sprengstoff abfeuern, mit ihren Maßnahmen zufrieden, obwohl nie ein positiver Effekt festgestellt werden konnte. Vermutlich erklärt sich das mit der persönlichen Befriedigung der Kanoniere (Wieringa und Holleman 2006).

In der Steiermark besteht ein wissenschaftlicher Zugang zum Thema Hagelabwehr seit dem Jahr 1955, als die Steirische Hagelabwehrgenossenschaft gegründet wurde.



(a)



(b)

**Abbildung 2.1:** (a) Historische Hagelkanonen am dritten internationalen Kongress zum Thema Wetterschießen in Lyon 1901 (Changnon and Ivens 1981). (b) Moderne Hagelkanone der Firma Eggers ([www.hailcannon.com](http://www.hailcannon.com)).

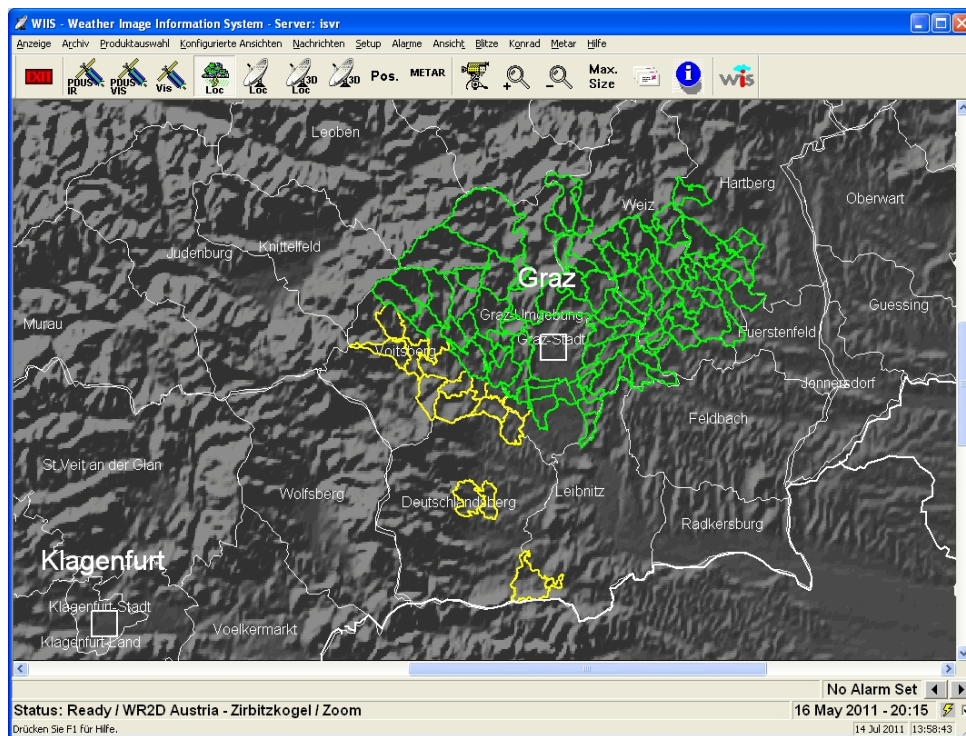
## 2.2 Hagelabwehr in der Steiermark

### Plattform Hagelabwehr Steiermark

Die Plattform Hagelabwehr Steiermark hat als Ziel die Warn- und Abwehreffizienz von Hagelereignissen zu verbessern. Die Bereitstellung von aktuellen Wetterradar- und Positionsdaten sowie die Ausstattung der Flugzeuge mit mobilen Wetterradardisplays waren ein erster Schritt in diese Richtung. Die Aufzeichnung der Seeding-Aktivitäten<sup>2</sup> seit dem Jahr 2009 und der Aufbau einer Datenbank mit weiteren Informationen sind derzeit im Gange. Außerdem wird zur Zeit an der Entwicklung eines Auswerteprogramms gearbeitet, welches in Zukunft eine Aussage über den Erfolg der Hagelabwehr ermöglichen soll. Die vorliegende Arbeit soll die theoretischen Grundlagen für dieses Auswerteprogramm liefern.

<sup>2</sup> siehe Kapitel 2.6

Mitglieder der Plattform Hagelabwehr Steiermark sind die Hagelabwehrbetreiber HailAir mit einem Flugzeug und die Steirische Hagelabwehrgenossenschaft mit drei Flugzeugen sowie dem Radar auf der Reicherhöhe. Als dritter Hagelabwehrbetreiber war bis zum Jahr 2010 die Firma Südflug Teil dieser Kooperation. Die ZAMG<sup>3</sup> liefert die Auswertung der aufgestellten Hageltestplatten<sup>4</sup> und die Österreichische Hagelversicherung stellt die Anzahl der (durch Hagel verursachten) Schadensmeldungen pro Gemeinde und Tag zur Verfügung. Die TU Graz übernimmt mit der AG Radartechnik und Mikrowellenausbreitung die wissenschaftliche Begleitung des Projekts. Die durch die Plattform Hagelabwehr Steiermark betreuten Gemeinden werden in Abbildung 2.2 gezeigt (Stand: Juli 2011). In den Bezirken Deutschlandsberg, Leibniz und Bad Radkersburg wird durch die Firma Südflug ebenfalls Hagelabwehr betrieben. Über Zeit und Ort der dortigen Maßnahmen liegen für diese Arbeit jedoch keine Daten vor, weshalb diese Bezirke bei einer Evaluierung ausgenommen werden müssen. Dieses Thema wird an späterer Stelle in dieser Arbeit besprochen.



**Abbildung 2.2:** Die Mitgliedsgemeinden der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft (grün) und die durch die HailAir betreuten Gemeinen (gelb). Abb. aus WIIS<sup>5</sup>.

<sup>3</sup> Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik

<sup>4</sup> siehe Kapitel 3.3

<sup>5</sup> Weather Image Information System, siehe Kapitel 3.8

### Die Steirische Hagelabwehrgenossenschaft

Als ältester Hagelabwehrbetreiber der Steiermark soll an dieser Stelle die Steirische Hagelabwehrgenossenschaft vorgestellt werden. Sie besteht seit dem Jahr 1955 und hat ihre Einsatzleitung am Flugplatz Unterfladnitz bei Weiz. Wie bereits in der Einleitung erwähnt verlangt der technische Fortschritt ständig eine Anpassung des operativen Geschäfts. Anfangs wurden Raketen, hauptsächlich aber Bodengeneratoren eingesetzt, um das Silberjodid (chemische Formel: AgJ) auszubringen. Eingeschalten wurden die Generatoren nach entsprechenden Prognosen des Wetterdienstes des damaligen Bundesamtes für Zivilluftfahrt (der heutigen Austro Control) auf dem Flughafen Graz-Thalerhof. Seit 1987 ist gänzlich auf Flugbetrieb umgestellt. Der Zugang zu den Wetterradardaten der Austro Control im Jahr 1992 und in weiterer Folge die Anschaffung eines eigenen Radars auf der Reicherhöhe (Gemeinde Übelbach) im Jahr 2003 waren große Fortschritte für die Steirische Hagelabwehrgenossenschaft. Seit 2009 werden in den Flugzeugen Radarbilder angezeigt, an denen sich die Piloten orientieren können, um das AgJ möglichst in die richtigen Gebiete der Wolke zu bringen. Früher musste das nach „Gefühl“ passieren bzw. gab es Anhaltspunkte, wie z.B. die Hauptaufwindzone, die sehr viel Staub vom Boden mit sich führt und deshalb gut erkennbar ist.

Im Jahr 2010 wurde von der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft der Einsatzzeitraum von 2. Mai bis 30. September festgelegt, wobei tatsächliche Einsätze zwischen dem 14. Mai und dem 4. September stattgefunden haben. Insgesamt wurden über 1000 Liter Silberjodid verbraucht. Der stärkste Monat war der Juni mit 10 Einsatztagen, 62 Einsätzen und einem AgJ-Verbrauch von 290 Liter. Das Jahr 2010 stellt ein relativ ruhiges Jahr dar. 1991 wurden über 6800 Liter AgJ verbraucht, 2001 lediglich 740 Liter (Pachatz 2005).

## **2.3 Hagel**

Als Hagel werden Eiskörner mit einem Durchmesser von mindestens 5 mm bezeichnet. Kleinere Eispartikel nennt man Graupel oder Griesel. Grundsätzlich wird zwischen „Winterhagel“ und „Sommerhagel“ unterschieden, wobei Winterhagel in dieser Arbeit nicht behandelt wird. Man erkennt diesen an der niederen 0-°C-Grenze in der Atmosphäre. Im Wesentlichen besteht Winterhagel aus Wassertropfen die durch die niederen Temperaturen gefrieren und zu Boden fallen. Von Sommerhagel sprechen wir, wenn die 0-°C-Grenze bei etwa 3000-4000 m Höhe<sup>6</sup> liegt. Sommerhagel entsteht in konvektiven Zellen.

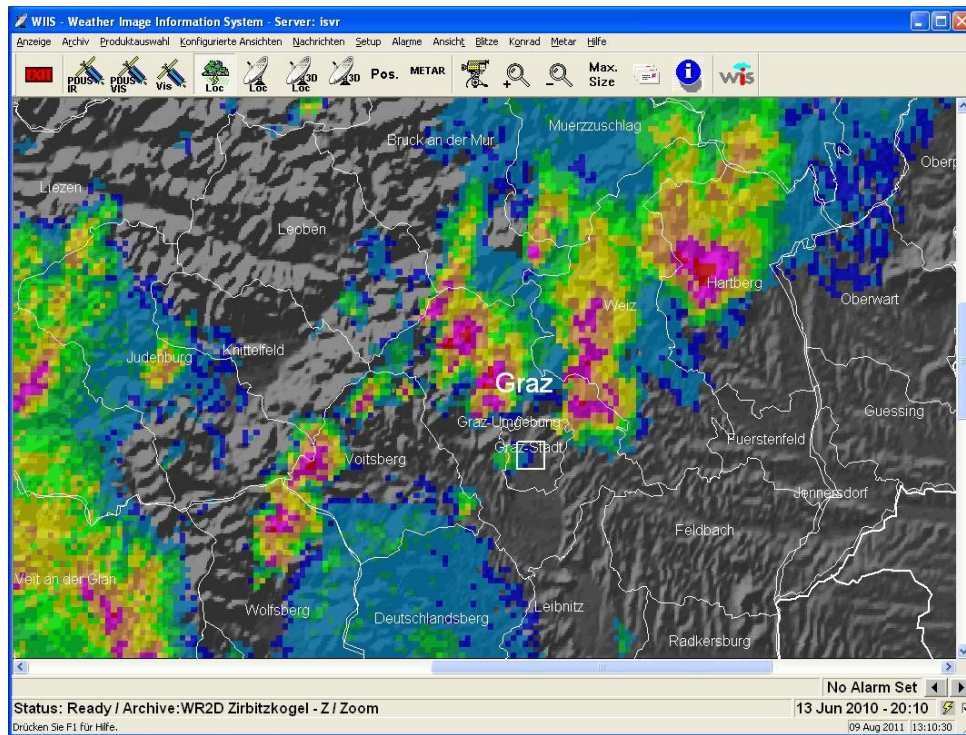
Stratifomer Niederschlag: Langanhaltender gleichmäßiger Niederschlag aus einer einheitlichen, weit ausgedehnten, geschlossenen Wolkendecke.

Konvektiver Niederschlag: Kurz andauernder, räumlich stark begrenzter, meist heftiger Niederschlag. Am Wetterradar sind die charakteristischen Zellstrukturen gut erkennbar (Abb. 2.3).

---

<sup>6</sup> In dieser Arbeit wird mit Höhe immer die Höhe über dem Meer bezeichnet.





**Abbildung 2.3:** Konvektive Zellen über der Steiermark (13.06.2010, 20:10 UTC<sup>9</sup>). Die roten Pixel stellen Bereiche mit hoher Reflektivität dar (vgl. Abbildung 3.2). Abb. aus WIIS.

Konvektive Zellen entstehen in sogenannten Cumulonimbus<sup>7</sup>-Wolken (Abk. Cb). Diese entstehen, wenn die Temperaturdifferenz zwischen Erde und höher gelegenen Luftschichten sehr groß ist. Die bodennahen Luftschichten sind dann labil und erzeugen einen Aufwind. Während der Aufwärtsbewegung kühlt die Luft ab. Sobald der Taupunkt<sup>8</sup> unterschritten wird kondensiert ein Teil des Wasserdampfes und bildet Tropfen. Cb-Wolken können bis in ca. 15 km Höhe reichen, sie haben typischerweise einen Durchmesser von ca. 10 km, wobei die Aufwindzone, in der Hagelkörner wachsen können, etwa 1 km Durchmesser aufweist (Wieringa und Holleman 2006). Durch die starken Aufwinde gelangen Wasserteilchen in kalte Luftschichten, wo sie gefrieren können. Durch mehrmaligen Auf- und Abstieg gewinnen die Eiskörner an Größe, bis sie so schwer sind, dass sie dem Aufwind trotzen und zu Boden fallen.

Üblicherweise gefrieren die Wasserteilchen nicht bei Null Grad. Sie sind unterkühlt<sup>10</sup> und benötigen bei Temperaturen wärmer als -40 °C Gefrierkeime<sup>11</sup>, d.h. Feststoffpartikel oder bereits vorhandene Eiskristalle, so genannte Hagelembryos, an die sie sich anlagern können (Emde 1994). Die Zahl sol-

<sup>7</sup> lat. *cumulus* = Anhäufung und *nimbus* = Regenwolke

<sup>8</sup> Die Temperatur, bei der abhängig vom Luftdruck die Kondensation einsetzt.

<sup>9</sup> Universal Time, Coordinated. Entspricht der früher verwendeten Greenwich Mean Time GMT. Die österreichische Zeit ergibt sich im Winter aus UTC+1, in der Sommerzeit aus UTC+2 Stunden.

<sup>10</sup> Wasser kann bis zu einer Temperatur von etwa -40 °C in flüssiger Form existieren, obwohl dies nicht dem Aggregatzustand entspricht. 0 °C stellen bei Wasser nicht den Gefrierpunkt, sondern den Schmelzpunkt dar, d.h. unter Normalbedingungen verwandelt sich Eis bei 0 °C in Wasser. Umgekehrt kann, muss aber nicht, Wasser bei 0 °C gefrieren.

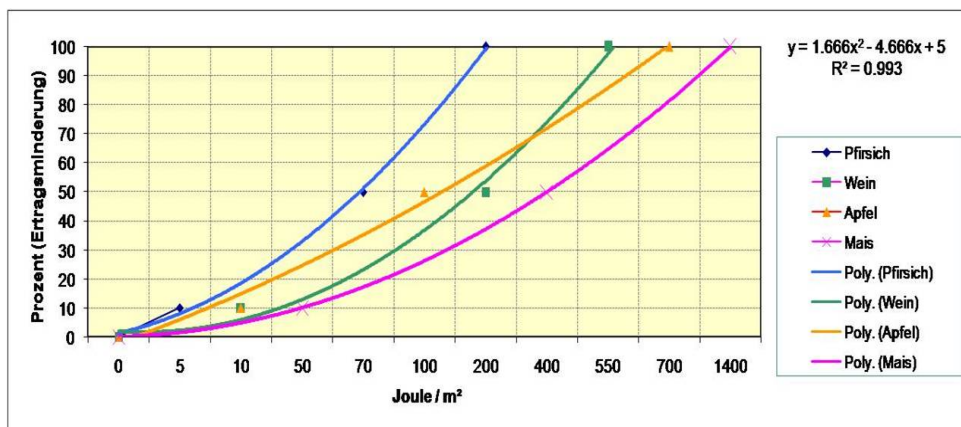
<sup>11</sup> Man unterscheidet Kondensationskeime, welche für die Bildung von Wassertropfen benötigt werden, und Gefrierkeime, welche für die Entstehung von Eisparkeln verantwortlich zeichnen. Je nach der atomaren Struktur der Teilchen setzt ihre Wirkung bei verschiedenen Temperaturen ein. Silberjodid findet häufig Anwendung, da seine Kristallstruktur der des Eises sehr ähnlich ist (siehe Kapitel 2.5).



cher Gefrierkeime ist in der Natur zu gering, deshalb verbleibt der Großteil des Wassers in unterkühltem flüssigen Zustand in der Atmosphäre. Hagelkörner wachsen in den Bereichen einer Wolke an, wo viel unterkühltes Wasser vorhanden ist. Sind die Hagelkörner derart angewachsen, dass der Aufwind, der bis zu  $50 \frac{m}{s}$  (Emde 1994) erreichen kann, nicht mehr ausreicht, um sie in der Atmosphäre zu halten, fallen sie zu Boden. Unterhalb der  $0^\circ\text{C}$ -Grenze schmelzen sie. Wenn die Hagelkörner in einer Höhe von ca. 3500 m einen Durchmesser von mindestens 1 cm haben, muss man damit rechnen, dass ein Teil von ihnen in gefrorener Form am Boden auftrifft (Schiesser 1988, zit. in Pachatz 2005).

Hagel kann unterschiedlich charakterisiert werden. Denkbare Kriterien sind u.a. die Anzahl der Hagelkörner, die Hagel-Korngrößenverteilung, der größte Durchmesser, die gesamte Masse der Körner oder die kinetische Energie eines Hagelereignisses. Die britische Hagel-Korngrößenklassifizierung nach TORRO<sup>12</sup> zeigt Tabelle 2.1.

Je nach Entwicklungsstadium, Regenerationsvermögen und Gesundheitszustand werden verschiedene Pflanzenarten durch Hagel unterschiedlich beschädigt. Roggen ist z.B. wesentlich weniger empfindlich als die Weinrebe mit ihren empfindlichen Blättern, Gescheinen<sup>13</sup> und Trauben. Die einzelnen Pflanzenarten werden bei der Hagelversicherung in verschiedene Gefahrenklassen eingeteilt. Dies geschieht anhand langjähriger Erfahrungen. Eine Hagelversicherung kostet der Landwirtschaft etwa 10 % des Rohertrags (Emde 1994). Im Rekordjahr 2004 betrug der durch Hagel verursachte Schaden in Österreich über 20 Millionen Euro. Hagelereignisse werden zusätzlich oft von starkem Regen und Wind begleitet, die ebenfalls Schäden verursachen können. In Abbildung 2.4 ist die Empfindlichkeit einiger Kulturenarten gegenübergestellt. In Tabelle 2.2 werden die Energiebeiträge von einem Korn einer Hagelkornklasse gezeigt.



**Abbildung 2.4:** Auswirkungen der berechneten Hagelenergiewerte auf einzelne Kultureerträge, Abb. aus Hagelabwehr in der Steiermark, 1982-2001, mit begleitender Untersuchung der ZAMG, Otto Svabik, ZAMG 2004.

<sup>12</sup> The TORnado and storm Research Organisation

<sup>13</sup> Als Geschein wird im Weinbau der längliche, rispenartige Blütenstand der Weinrebe bezeichnet.

Kategorie	Intensität	Korndurchmesser [mm]	Kinetische Energie [J/m <sup>2</sup> ]	Schaden
H0	Hard Hail	5	0-20	No damage
H1	Potentially Damaging	5-15	>20	Slight general damage to plants, crops
H2	Significant	10-20	>100	Significant damage to fruit, crops, vegetation
H3	Severe	20-30	>300	Severe damage to fruit and crops, damage to glass and plastic structures, paint and wood scored
H4	Severe	25-40	>500	Widespread glass damage, vehicle bodywork damage
H5	Destructive	30-50	>800	Wholesale destruction of glass, damage to tiled roofs, significant risk of injuries
H6	Destructive	40-60		Bodywork of grounded aircraft dented, brick walls pitted
H7	Destructive	50-75		Severe roof damage, risk of serious injuries
H8	Destructive	60-90		(Severest recorded in the British Isles) Severe damage to aircraft bodywork
H9	Super Hailstorms	75-100		Extensive structural damage. Risk of severe or even fatal injuries to persons caught in the open
H10	Super Hailstorms	>100		Extensive structural damage. Risk of severe or even fatal injuries to persons caught in the open

**Tabelle 2.1:** Hagel-Korngrößenklassifizierung nach TORRO ([www.torro.org.uk](http://www.torro.org.uk))

Durchmesser [mm]	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Energie [Joule]	0,003	0,044	0,221	0,689	1,704	3,533	6,546	11,167	17,888	27,264

**Tabelle 2.2:** Energiebeiträge von einem Korn einer Hagelkornklasse, aus Hagelabwehr in der Steiermark, 1982-2001, Otto Svabik, ZAMG 2004.

2009 kam es laut Versicherungsdaten in dem untersuchten Gebiet in der Steiermark an 121 Tagen (fast täglich!) zu Hagel und zwar zwischen dem 23. April und dem 13. Oktober. Es ist durchaus möglich, dass an einem Tag zwar Hagel aufgetreten ist, dieser aber keinen Schaden verursachte oder dass aus anderen Gründen auf eine Schadensmeldung verzichtet wurde. In diesem Fall müsste man von noch mehr Hageltagen sprechen, wobei ein Hageltag als ein Tag definiert ist, an dem mindestens ein bestätigtes Hagelereignis stattgefunden hat, unabhängig davon ob Schaden aufgetreten ist oder nicht. 2010 gab es 74 Hageltage zwischen dem 14. April und dem 13. September.

### Geographische und meteorologische Voraussetzungen für Hagel

Österreich liegt in einer besonders hagelgefährdeten Zone Europas. Innerhalb Österreichs ist besonders das südöstliche Alpenvorland, d.h. die Südost-Steiermark, aufgrund seiner Randgebirgsfußlage hagelgefährdet. Dies erklärt sich einerseits dadurch, dass von Westen her die kälteren, bodennahen Luftmassen durch die Berge abgeschirmt werden, was bedeutet, dass sie in höheren Schichten vorauseilen, und andererseits dadurch, dass von Ungarn und Slowenien her ein großes Potential an feucht-warmer Luft besteht (Lazar 1994). Dies sind genau die Voraussetzungen für Gewitter. Neben den Gurktaler Alpen ist das steirische Randgebirge die gewitterreichste Landschaft in Österreich (Pilger). Abbildung 2.5 zeigt die Gegenden in Österreich, in denen das Verhältnis aus *mittlere jährliche Anzahl der Tage mit Hagel* zu *mittlere jährliche Anzahl der Tage mit Gewitter*  $> 5\%$  ist. Es zeigt sich, dass das durch die Plattform Hagelabwehr Steiermark betreute Gebiet sehr gewitterreich ist und dass die Gewitter häufig von Hagel begleitet werden. In Summe ist diese Gegend stark hagelgefährdet.

Regionen mit erhöhtem Auftreten von  
Hagel in Österreich [  $\text{Hagel}/\text{Gewitter} \geq 5\%$  ]



**Abbildung 2.5:** Klimadaten 1951-1985, Entwurf: Otto Svabik, ZAMG, 1989

### 2.3.1 Mikrophysikalische Prozesse in der Atmosphäre

Dr. Klaus v.d. Emde (1994) von der ZAMG Wien beschreibt die mikrophysikalischen Prozesse in der Atmosphäre wie folgt:

*Tropfen bilden sich in der Atmosphäre an sogenannten Kondensationskernen. Die Anzahl und Größenverteilung der Kondensationskerne haben eine zentrale Bedeutung für die gesamte Wolken- und Hagelentwicklung, da diese die Größenverteilung der Tropfen mitbestimmen. Auf Grund der hygroskopischen Eigenschaften der Kondensationskerne kommt es schon bei relativen Feuchten von unter 100 % zur Bildung der ersten kleinen Dunsttropfen. Steigt die Übersättigung weiter, so können die Tropfen entsprechend dem Feuchteangebot weiter wachsen. Die Geschwindigkeit des Kondensationswachstums hängt dabei stark von der Übersättigung ab. Nachdem sich eine Anzahl von Tropfen durch Kondensation gebildet hat, können diese durch Zusammenstoßen und anschließender Vereinigung größere Tropfen bilden. Dieser Koagulationsprozess wirkt durch die unterschiedlich großen Fallgeschwindigkeiten verschieden großer und somit unterschiedlich schwerer Tropfen. Daher ist für die Wachstumsgeschwindigkeit der Tropfen durch Koagulation die Form des Tropfenspektrums ganz wesentlich (wären z.B. alle Tropfen gleich groß, könnten sie sich nicht einfangen, da alle Tropfen gleich schnell fallen würden). Je nachdem ob die Größenverteilung der Tropfen schmal oder breit ist, spricht man von der kolloidalen Stabilität bzw. Instabilität eines Tropfenensembles. Bei einem kolloidal instabilen Tropfenensemble werden schneller große Tropfen gebildet. Die Mikrophysik der Eispartikel ist gegenüber der flüssigen Phase wesentlich komplizierter. Dies ist zum Teil durch die unterschiedlichen Formen der Schneekristalle und -flocken, Graupeln und Hagel bedingt. Weiters unterscheidet man drei Arten der Bildung von Eispartikeln: Deposition (Anlagerung von Wassermolekülen aus der Dampfphase an Eiskerne), Gefrierkernnukleation (ein Eiskern befindet sich in einem Tropfen und löst das Gefrieren aus) und die Kontaktnukleation (die Vereisung eines unterkühlten Tropfens wird durch das Zusammenstoßen des Tropfens mit einem Eiskern ausgelöst). Homogenes Gefrieren von Wassertropfen (ohne Gefrierkern) tritt erst ab Temperaturen unter  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  auf. Daher kommt es bei Temperaturen zwischen  $0$  und  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  zur Koexistenz von unterkühlten Wassertropfen und Eispartikeln. Haben sich kleine Eispartikel gebildet, dann können sie durch Deposition von Wasserdampf an den Kristallen weiter anwachsen. Da der Sättigungsdampfdruck über Eis geringer ist als über Wasser, können Eispartikel wachsen, während Wassertropfen verdunsten. Dieser sogenannte Bergeron-Findeisen Effekt kann unter Umständen eine sehr schnelle Überführung von Wasser zu Eis bewirken. Nachdem die Eispartikel eine gewisse Größe erreicht haben, können sie durch Anlagerung von Kristallen und Anfrieren von unterkühlten Tropfen (Bereifen), also durch Koagulation zwischen Tropfen und Eispartikeln, weiterwachsen und eventuell die Größe von Hagelkörnern erreichen.*

#### Die Aggregatzustände des Wassers

Um Wasser vom flüssigen in den gasförmigen Aggregatzustand überzuführen, ist eine gewisse Menge Energie nötig. Diese Energie – genannt die Verdampfungswärme – beträgt bei Wasser pro Kilogramm  $538,9\text{ kcal}$  ( $\approx 2,256\text{ kJ}$ ). Bei der Kondensation wird genau diese Menge Energie – als Kondensationswärme – wieder freigesetzt. Der Übergang vom festen zum flüssigen Aggregatzustand verhält sich äquivalent. Die Schmelz- bzw. Gefrierwärme beträgt  $79,7\frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$  ( $\approx 334\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ ).

### 2.3.2 Dynamische Strukturen von Gewitterwolken

Damit die Eisteilchen genügend Zeit zum Wachsen haben, müssen sich die Fallgeschwindigkeiten und die Aufwinde in etwa die Waage halten. Ist der Aufwind zu stark, werden die Teilchen aus der Wolke „ausgeblasen“, bei zu schwachem Aufwind fallen die Körner aus, bevor sie genügend Zeit zum Anwachsen hatten. Bei der Tropfenbildung durch Kondensation entsteht Kondensationswärme, die den Aufwind verstärkt. Die Tropfen (bzw. Eiskristalle) fallen am Rand der Wolke in tiefere Luftschichten, dort werden sie nach innen in den Hauptaufwind getragen, steigen wieder in höhere Luftschichten und wachsen zu Hagelkörnern (Emde 1994). In Mehrzellengewittern und Superzellengewittern agieren anwachsende und abklingende Zellen miteinander, sodass es zu sehr variantenreichen Flugbahnen der Hagelkörner kommen kann.

Mehrzellengewitter: Mehrzellengewitter bestehen gleichzeitig aus mehreren konvektiven Zellen in verschiedenen Entwicklungsstadien. Die Hagelbildung kann, wie in einer einzelnen konvektiven Zelle, von statten gehen, bei gegebenen Luftströmungen können die Hagelkörner aber auch zwischen den Zellen in verschiedenen Entwicklungsstadien wechseln, was das Hagelwachstum verstärken (aber auch abschwächen) kann.

Superzellengewitter: In Superzellengewittern erreichen die Aufwinde bis zu  $50 \frac{m}{s}$ . Sie treten selten auf, bilden aber die größten Hagelkörner. Hauptauf- und Abwindzone sind voneinander getrennt, so kann der Aufwindbereich nicht vom Niederschlag zerregnet werden. Die Winde befinden sich in einem nahezu stationären Zustand. Superzellengewitter bilden die langlebigste Form der Gewittertypen. Die Unterscheidung zwischen Mehrzellen- und Superzellengewitter fällt nicht immer leicht, da auch verschiedene Mischformen existieren. (vgl. Emde 1994)

## 2.4 Möglichkeiten zur aktiven Hagelabwehr

Der Schutz von Obstkulturen mit Netzen<sup>14</sup> wird als „passive Hagelabwehr“ bezeichnet. Diese ist nicht Gegenstand dieser Arbeit und wird nicht weiter verfolgt. Als „aktive Hagelabwehr“ bezeichnet man Maßnahmen, die den natürlichen Hagelbildungsprozess in der Atmosphäre in der Art beeinflussen, dass am Boden möglichst kein Hagel auftrifft. Im Moment ist noch keine Vorgehensweise bekannt, die es ermöglicht vorhandenen Hagel in der Atmosphäre zu bekämpfen, also z.B. mittels Schallwellen Hagelkörner zu „zerbrechen“. Die bekannten Methoden zielen alle darauf ab die Entstehung von Hagel in gewünschter Form zu beeinflussen oder gar zu verhindern.

Die Theorien zur Hagelbekämpfung ähneln denen des „Precipitation Enhancement“, also der künstlichen Steigerung von Niederschlag, etwa zur Sicherung der Wasserversorgung, sehr stark und werden weiter unten erläutert. Wenn man Hagelabwehr betreibt, dann beeinflusst man auch automatisch die Niederschlagsmenge (vgl. Aleksic 1988). Den niederschlagsfähigen Wassergehalt der Luftmassen bezeichnet man als „Precipitable Water“. Normalerweise können etwa 10 % des Wasserdampfes ausfallen.

<sup>14</sup> Bei fachgerechtem Einsatz bieten Netze einen sehr hohen Grad an Schutz vor Hagelschlag. Sie sind jedoch teuer und müssen gewartet werden. Netze beeinflussen das Mikroklima der Pflanzen und erschweren den Zugang bei der Bewässerung, Schädlingsbekämpfung, Rebschnitt usw.

### 2.4.1 Hypothesen zur Hagelunterdrückung

Möchte man den Prozess der Hagelbildung beeinflussen, so muss dieser natürlich auch verstanden werden. Die Tropfenbildung in der Eiskristallbildungsphase wird durch den Bergeron-Findeisen-Effekt erklärt. In den Bereichen einer Wolke, in denen zwischen 0 °C und -40 °C herrschen, existieren sowohl Eispartikel als auch flüssiges (unterkühltes) Wasser. Bei gleicher Temperatur herrscht über Eis ein geringerer Sättigungsdampfdruck als über flüssigem Wasser. Die Luft ist dort schon früher gesättigt und kondensiert. Gleichzeitig verdunstet über den Wassertropfen noch Wasser. Der entstandene Wasserdampf kondensiert am Eis und es kommt zu einem raschen Wachstum der Hagelkörner. Für die Entstehung von Hagel müssen also Hagelembryos, unterkühltes Wasser, und Aufwinde vorhanden sein.

Die oft gewaltigen Abmessungen einer Wolke und die riesigen Wassermengen, die innerhalb einer Wolke mitgetragen werden können, setzen den Menschen vor Grenzen bei der Beeinflussung des Wettergeschehens. Eine der wenigen Möglichkeiten besteht darin, die Anzahl der Gefrier- und Kondensationskeime zu erhöhen. An dieser Stelle kommen die Hypothesen der Hagelunterdrückung zur Geltung. Durch das Ausbringen bestimmter Mittel (*Seeding*, siehe unten) in gewisse Bereiche einer Wolke kann man die Anzahl und die Größe der Wasser- bzw. Eisteilchen beeinflussen. Auf diese Weise werden in weiterer Folge die Temperaturen und die Windverhältnisse innerhalb der Wolke verändert, was wiederum die Geometrie der Wolke beeinflusst. Es werden die Bedingungen für die Bildung von Hagelkörnern geändert. Gelingt es z.B. Hagelembryos in eine Höhe oberhalb der -40-°C-Grenze zu tragen, so ist kein unterkühltes Wasser mehr vorhanden und die Embryos können nicht wachsen, d.h. wenn Eispartikel von einem starken Aufwind sehr schnell durch die Hagelwachstumszone getragen werden, dann werden sie kleiner ausfallen.

Im Grunde genommen muss man sich auf das „Kitzeln“ der Wolken beschränken, da man mit roher Gewalt nicht gegen die Naturgewalten ankommt. Im Folgenden werden die bekanntesten Methoden und Hypothesen zur Hagelunterdrückung kurz vorgestellt:

#### **Beneficial Competition**

Das Wettbewerbsprinzip ist die am meisten verbreitete These und beruht darauf, dass in einer Wolke eine gewisse Menge an Wasser vorhanden ist. Wasser benötigt Gefrierkeime, um vom flüssigen in den festen Aggregatzustand wechseln zu können. In der Natur ist die Anzahl dieser Keime relativ gering, somit haben wenige Eiskörner viel unterkühltes Wasser zur Verfügung und können stark anwachsen. Werden nun zusätzlich Gefrierkeime in die Hagelbildungszone eingebracht, so trägt das zu einer vermehrten Bildung von Hagelkörnern bei. Das vorhandene Wasser teilt sich dann auf eine größere Anzahl von Hagelkörnern auf, wodurch diese kleiner ausfallen. Im Idealfall schmelzen die Körner vor dem Auftreffen am Boden. Bei dieser Methode besteht die Gefahr, dass zu wenig künstliche Eiskeime erzeugt werden. Der Wettbewerb um das unterkühlte Wasser reicht nicht aus und man erzeugt mehr Hagelkörner, die groß genug sind, dass sie vor dem Schmelzen am Boden auftreffen. (vgl. ASCE)

### Early Rainout

Alle Hydrometeore<sup>15</sup>, die abregnen, bevor sie die stärkeren Aufwindzonen erreichen und somit in die Hagelwachstumszone gelangen, können nicht mehr zu einem Hagelkorn heranwachsen. Dies kann durch frühzeitiges Behandeln der Wolke mit geeigneten Mitteln erreicht werden, wenn dadurch vermehrt Regentropfen bzw. Graupel entstehen, solange der Aufwind schwach ist. Die schweren Tropfen fallen dann aus der Wolke. Idealerweise wird bei der Methode des „Early Rainout“ ein Teil des unterkühlten Wassers aus der Wolke ausfallen, um die Hagelwachstumszone zu schwächen. Eine Gefahr bei dieser Methode besteht darin, dass durch das frühere Ausfallen der Graupel das Gewicht der Partikel in der Luft verringert wird, was zu einer Verstärkung des Aufwindes führt. Ein stärkerer Aufwind kann das Wachstum großer Hagelkörner begünstigen.

### Verändern der Hagelkornflugbahn

Im Englischen wird diese Methode als „Trajectory Lowering“ bezeichnet. Hier wird wiederum für eine frühzeitige Bildung von Hydrometeoren gesorgt. Wenn diese nicht, wie im Falle des „Early Rainout“, aus der Wolke ausfallen, werden sie einer niedrigeren Flugbahn folgen, da sie für die Aufwinde bereits zu groß und damit zu schwer sind. Das bedeutet kürzere Aufenthalts- und Wachstumsphasen, weil sie nicht in die Gebiete mit dem größten Vorrat an unterkühltem Wasser gelangen und weil in geringeren Höhen die Temperatur höher ist. Die kleineren Hagelkörner haben wieder die Möglichkeit zu schmelzen, bevor sie den Boden erreichen. „Trajectory Lowering“ kann durchaus erreicht werden, wenn man versucht dem Konzept des „Early Rainout“ zu folgen. Die beiden Methoden sind eng miteinander verbunden. (vgl. ASCE)

### Glaciogenic/Hygroscopic Seeding

Bei „Glaciogenic Seeding“<sup>16</sup> versucht man mit Hilfe eines Mittels (z.B. AgI oder Trockeneis) kleine unterkühlte Wassertröpfchen zu Eiskristallen zu verwandeln. Diese können schnell anwachsen und aus der Wolke ausfallen. Beneficial Competition, Early Rainout und Trajectory Lowering sind Vertreter von Glaciogenic Seeding. Die Unterscheidung der Impfhypothesen hinsichtlich der Eigenschaften der eingesetzten Mittel wurde von Cotton und Pielke (1995) übernommen (vgl. NRC).

Man unterscheidet:

- „Static Seeding“: Dieses Konzept geht davon aus, dass Wolken zu wenig natürliche Nuklei besitzen, um das gespeicherte Wasser in Form von Niederschlag ausfallen zu können. Es befindet sich also eine große Menge von unterkühltem Wasser in der Wolke, welches nicht für Niederschlag „genutzt“ wird. Durch Zufuhr einer „optimalen“ Menge von künstlichen Nuklei wird die Niederschlagsmenge erhöht. Man geht bei mehr Gesamtniederschlag davon aus, dass weniger Hagel am Boden auftritt.

---

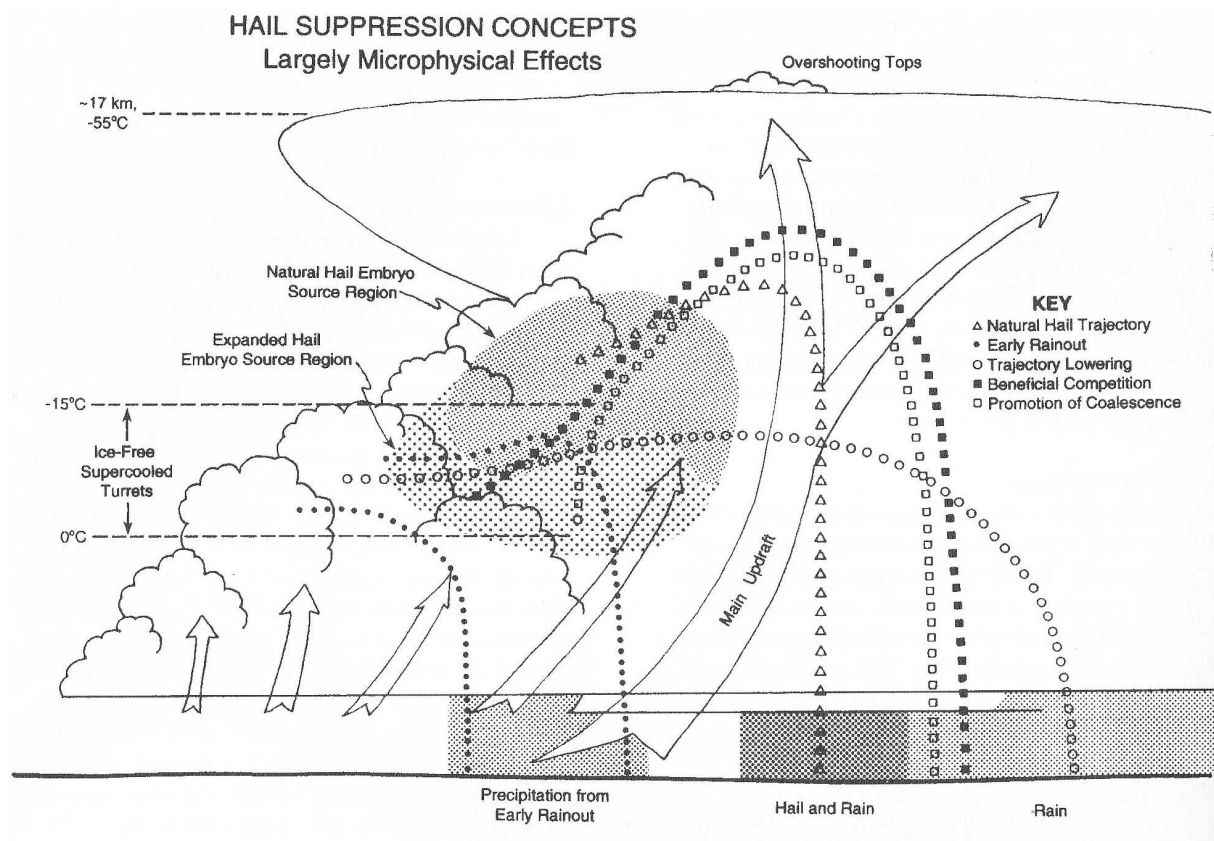
<sup>15</sup> Regentropfen, Graupel, Eiskörner

<sup>16</sup> Lat. *glacies* - Frost, Eis; Cloud Seeding - Wolkenimpfen, siehe Punkt 2.6

- „Dynamic Seeding“: Durch das Einbringen großer Mengen von Seeding-Material kommt es wiederum zur Bildung von Eiskristallen. Die resultierende Verstärkung des Aufwindes und das insgesamt verstärkte Wachstum der Wolke führen dieser These nach zu vermehrtem Niederschlag. Static- und Dynamic Seeding schließen einander gegenseitig nicht aus, da beide Methoden die Zahl der Eiskristalle erhöhen, das gleiche Material verwenden und die Wolkendynamik beeinflussen. Lediglich die Menge (ca. Faktor 10) des eingebrachten Silberjodids unterscheidet sich.

„Hygroscopic Seeding“<sup>17</sup> nützt eine Eigenschaft von bestimmten Mitteln (Salze), die sich vorzugsweise mit Wasserdampf binden. So entstehen kleine Tropfen, die sich zu großen Tropfen vereinigen können (Koaleszenz) und abregnen. Hygroscopische Mittel erhöhen also die Anzahl der Wassertropfen, während bei Glaciogenic Seeding die Vereisung des Wassers verfolgt wird. Oft werden wasseranziehende- und eiskeimbildende Mittel gleichzeitig eingesetzt, da sie sich positiv ergänzen können. (vgl. Cotton und Pielke 1995)

### Überblick über die Hagelabwehrkonzepte



**Abbildung 2.6:** Vertikalschnitt durch eine Gewitterwolke und eine Gegenüberstellung unterschiedlicher Hagelkornflugbahnen für verschiedene Hagelabwehr-Hypothesen. (Abb. aus WMO 1996, zit. in ASCE).

<sup>17</sup> Altgr. *hygros* - feucht, nass



Allgemein ist zu all diesen Hypothesen zu sagen, dass sie zwar in Laborversuchen erfolgreich waren und allgemein anerkannt sind, es ist aber in allen Bereichen eines Hagelabwehrprozesses, von der Frühwarnung über das Ausbringen von AgJ bis zur Evaluierung, noch wesentlich mehr Verständnis nötig, besonders im Bereich der Wolkenphysik (vgl. ASCE, NRC).

### 2.5 Die Wirkung von Silberjodid

Silberjodid (chemische Formel: AgJ) besteht aus Silber (Ag) und Jod (J) und ist eine schwerlösliche ionische Verbindung. Wie bereits erwähnt, benötigt Wasser „Eiskeime“ um in der Atmosphäre gefrieren zu können. Die Gitterstrukturen von Wasser und AgJ sind sehr ähnlich, sodass sich Silberjodid hervorragend als Ergänzung zu den natürlichen Kristallisationskeimen eignet.

1947 entdeckte Bernard Vonnegut die „Eiskeimbildende Fähigkeit“ von Silberjodid. Seit damals wird es neben anderen Mitteln verwendet, um potentielle Gewitterwolken (=Hagelwolken) zu impfen. Obwohl es relativ teuer ist, bietet es doch einige Vorzüge: (ASCE)

- Es beschleunigt die Kristallisation, ungeachtet des eingesetzten Mechanismus.
- Es ist relativ unlöslich bei  $< 10^{-9}$  g pro Gramm Wasser, sodass die Partikel Eiskeime bilden können, bevor sie sich (im Wasser) auflösen.
- Es ist bei hohen Temperaturen stabil genug, um Verdampfung und Rekondensation zu ermöglichen. So entsteht eine große Anzahl<sup>18</sup> von funktionellen Nuklei pro verbranntem Gramm AgJ. (Finnegan 1998, zit. in ASCE)
- Trotz mehrjährigem Einsatz wurden keine schädlichen Umwelteinflüsse festgestellt.

AgJ wird durch verschiedene Methoden in die Wolke eingebracht (siehe unten). Es bildet Kristallisationskerne und trägt somit zur vermehrten Bildung von Hagelkörnern bei. Dadurch, dass aber nur eine begrenzte Menge von Wasser in der Wolke vorhanden ist, gibt es zwar mehr, aber kleinere Hagelkörner, welche im Idealfall vor dem Auftreffen am Boden schmelzen (Beneficial Competition, siehe oben).

Unter Lichteinstrahlung zerfällt AgJ nach einer gewissen Zeit photochemisch in die Bestandteile Silber und Jod und ist dann für die Zwecke der Hagelabwehr nicht mehr geeignet.

---

<sup>18</sup>  $5,4 \times 10^{12}$  Partikel pro Gramm bei  $-10$  °C,  
 $22 \times 10^{12}$  Partikel pro Gramm bei  $-15$  °C und  
 $40 \times 10^{12}$  Partikel pro Gramm bei  $-21$  °C (Höller und Meischner 1993, zit. in Pachatz 2005).

## 2.6 Seeding

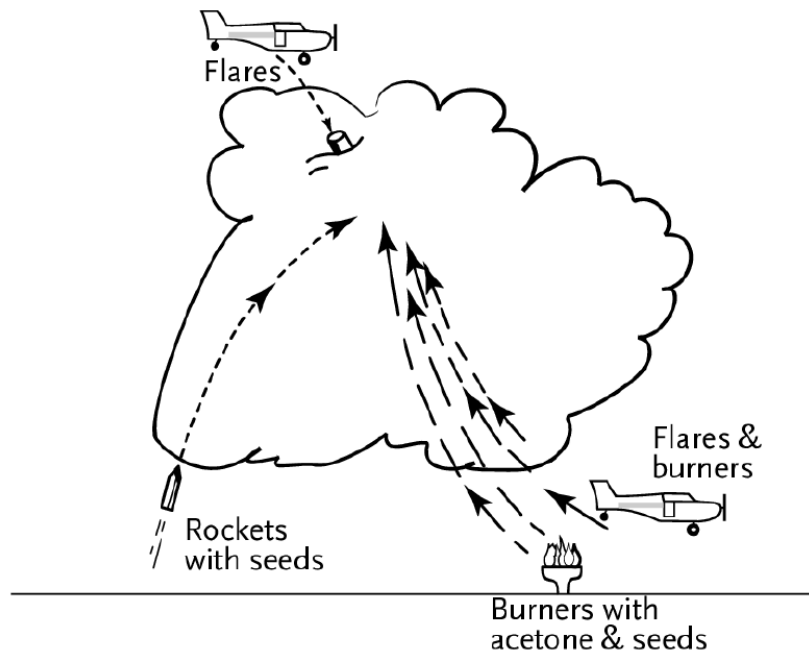
Mit Seeding bezeichnet man das Impfen der Wolken, also das Ausbringen von AgJ oder anderen Wirkstoffen. Meist geschieht das durch Verbrennen einer Silberjodid-Azetonlösung.

Seeding erfolgt mittels Bodengeneratoren, Raketen oder Flugzeugen (Abb. 2.7):

- **Bodengeneratoren:** Die Generatoren werden an exponierten Stellen wie z.B. auf Bergkuppen platziert. Man geht davon aus, dass die Aufwinde der Gewitterwolken das Silberjodid in diejenigen Bereiche der Wolken bringt, wo es wirken kann. Das Behandeln von Wolken mittels Bodengeneratoren stellt die billigste Methode dar, obwohl üblicherweise mehr AgJ verbraucht wird, da die Generatoren zeitig eingeschaltet werden müssen und ein größeres Gebiet zu behandeln ist. Die Früherkennung von Gewitterzellen ist bei dieser Methode besonders wichtig. Offen ist bei dieser Methode, ob das AgJ tatsächlich in die vorgesehenen Bereiche der Wolke gelangt und ob das Mittel, das unter Lichteinstrahlung in seine Bestandteile zerfällt, dann noch wirksam ist.
- **Raketen:** Ein Vorteil bei der Verwendung von Raketen ist, dass diese recht genau ins Ziel geschossen werden können und dass das gesamte Zielgebiet gleichzeitig behandelt werden kann. Die Reaktionszeit der Raketen auf ein Seedingfordernis ist unter den drei vorgestellten Möglichkeiten am kürzesten. Werden Raketen und Flugzeuge nebeneinander eingesetzt, ist natürlich Vorsicht geboten. Ebenso kann der Einsatz von Raketen über bewohntem Gebiet problematisch sein.
- **Flugzeugen:** Die Flugzeuge können das AgJ entweder oberhalb der Wolke ausbringen, dann fällt das Silberjodid in die Wolke hinab, oder das Mittel wird an der Wolkenbasis, also unterhalb ausgebracht. Im zweiten Fall nehmen die Aufwinde das Mittel mit sich mit und bringen es in die Bereiche der Wolke, wo es wirksam werden kann<sup>19</sup>. Der Einsatz von Flugzeugen ist sehr weit verbreitet, da man das Silberjodid sehr genau in die Wolke einbringen kann. Das stellt einen Vorteil gegenüber Bodengeneratoren dar, wo sehr großräumig AgJ ausgebracht wird. Ein erfahrener Pilot kann in einem Wolkensystem Bereiche unterscheiden, die mittels Radar nicht erkennbar sind. Dieser Vorteil der visuellen Beurteilung darf nicht unterschätzt werden.

Wichtig ist, dass man das AgJ zum richtigen Zeitpunkt in die Wolke einbringt. Der richtige Zeitpunkt ist dann, wenn der natürliche Vorgang der Hagelbildung beginnt. Das Silberjodid soll in die Bereiche der Wolke eingebracht werden, in denen große Mengen von unterkühltem Wasser vorhanden sind. Wieringa und Holleman (2006) schätzen das Gebiet, in dem tatsächlich Hagel entsteht, durchschnittlich mit ca.  $1 \text{ km}^3$  in etwa 5000 m Höhe. Die Zellen müssen möglichst zu einem Zeitpunkt geimpft werden, bevor große Tropfen und Hagelkörner vorhanden sind. Leider stammt der überwiegende Teil der Radarreflektivität genau von solchen Hydrometeoren, sodass es nicht immer leicht fällt die behandelbaren Gebiete festzulegen. Es sind Vorhersagen notwendig, um Hagelzellen effektiv behandeln zu können. Seeding beeinflusst eine Wolke nicht nur in Hinsicht auf die Anzahl der Nuklei, sondern auch auf die Temperatur innerhalb einer Wolke durch Gefrieren und Verdampfen. Durch diese Beeinflussung kann sich auch die

<sup>19</sup> Das sind die Bereiche mit unterkühltem Wasser.



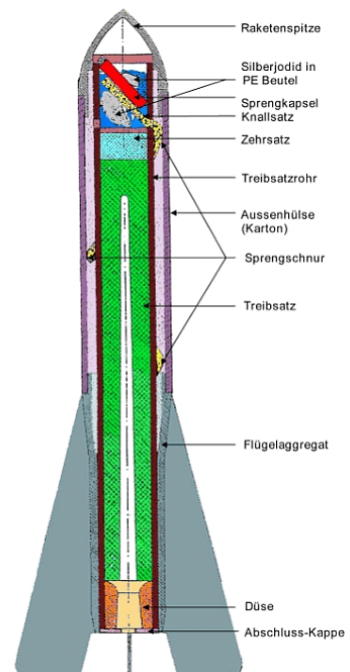
**Abbildung 2.7:** Möglichkeiten eine Wolke zu behandeln (Abb. aus Wieringa und Holleman 2006).

vertikale Ausdehnung eines Wolkenturms verändern. Es können immer unbeabsichtigte Effekte auftreten, wenn man das Wetter beeinflussen möchte. Seeding zum Zweck der Hagelabwehr erhöht oft die Niederschlagsmenge, so kann es notwendig sein, dass in landwirtschaftlichen Gegenden ein Hagelabwehrprojekt ausgesetzt wird, wenn eine längere Regenperiode war oder wenn eine Ernte eingefahren werden muss, auch wenn in diesem Fall bewusst auf die Hagelabwehr verzichtet wird.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich nicht mit dem Thema des Seedings. Zeitpunkt, Ort und Menge des ausgebrachten AgJ werden als optimal angenommen. Auf jeden Fall muss der Ort gegen den Wind des Zielgebietes liegen und man sollte wissen, wie lange es dauert, bis das AgJ wirkt, und welche Entfernung die behandelte Wolke in dieser Zeit zurücklegt. Der Einfluss des richtigen Seeding ist ganz essentiell. Besonders in diesem Bereich ist ein bestmögliches Verständnis der Abläufe innerhalb einer Wolke notwendig.



**Abbildung 2.8:** Bodengenerator der ANELFA (Frankreich)



**Abbildung 2.9:** Hagelabwehrrakete der Hamberger Hans AG. Steighöhe ca. 1500 m, Silberjodid 15 g, Länge 520 mm, Gesamtgewicht 890 g.



**Abbildung 2.10:** Hagelabwehr-Flugzeug der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft. Foto zur Verfügung gestellt von F. Gruber.



**Abbildung 2.11:** AgJ-Azeton-Brenner in Betrieb. Foto zur Verfügung gestellt von F. Gruber.

## Kapitel 3

# Vorhandene Daten und Datenquellen

Um Wettervorhersagen zu ermöglichen, ist es nötig, über verschiedene Daten aktuell und verlässlich zu verfügen. Werden vergangene Wettersituationen betrachtet, entweder um Wettervorhersage-Werkzeuge zu entwickeln oder um getroffene Maßnahmen zu evaluieren, so sind verlässliche und lückenlose Aufzeichnungen ebenso wünschenswert. In den letzten Jahrzehnten wurden einige Werkzeuge und Methoden entwickelt, die nützlich sind, um physikalische Prozesse in Wolken messen und modellieren zu können. Für die Plattform Hagelabwehr Steiermark<sup>1</sup> stehen die in den folgenden Punkten erläuterten Datenquellen zur Verfügung.

### 3.1 Radar und Radardaten

Die Aufgabe herkömmlicher Radargeräte<sup>2</sup> beschränkt sich meist auf das Erkennen und Orten von Flugzeugen oder Schiffen, während ein Wetterradar die Niederschlags-Verhältnisse in der Atmosphäre messen soll. Das Grundprinzip dieser beiden Gerätetypen ist das gleiche: Man sendet einen elektromagnetischen Impuls aus, dieser trifft auf ein Objekt und ein Teil der Energie des Impulses gelangt zurück zur Antenne. In der vorliegenden Arbeit werden ausschließlich Daten von Wetterradars verwendet, wann immer von Radargeräten oder Radardaten gesprochen wird sind die Daten von Wetterradars gemeint.

Radardaten stellen das wichtigste Werkzeug für den Betrieb und die Evaluierung von „Weather Modification“-Projekten dar. Diese Daten sind meist durchgehend verfügbar und räumlich sowie zeitlich relativ gut aufgelöst. Sie zeigen die geometrischen Abmessungen einer Wolke und die Bereiche innerhalb einer Wolke mit mehr oder weniger Reflektivität. Moderne Anlagen können noch die Windgeschwindigkeit relativ zum Radar messen (Doppler) und die unterschiedlichen Niederschlagsformen in der Atmosphäre grob unterscheiden (mittels doppelter Polarisation).

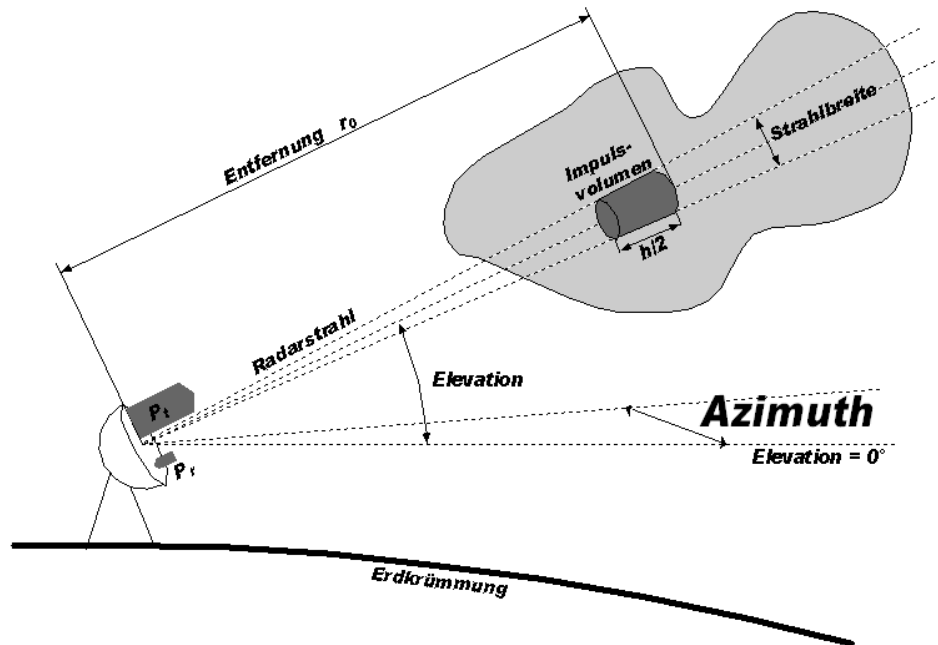
---

<sup>1</sup> siehe: Kapitel 2.2

<sup>2</sup> RAdio Detection And Ranging, frei übersetzt: Funkortung und Abstandsmessung

### 3.1.1 Funktionsweise eines Wetterraders

Der derzeitige Standard bei Wetterraders sind sogenannte (C-Band) Doppler-Radars, die einen horizontal polarisierten elektromagnetischen Impuls aussenden. Die Austro Control in Österreich verwendet aktuell solche Geräte, weshalb im Folgenden besonders dieser Typ beschrieben wird. Die Notation dieses Kapitels wurde aus den Vorlesungsunterlagen Wetterraderstechnik (Randeu 2010) übernommen.



**Abbildung 3.1:** Prinzip eines Wetterraders mit Radarstrahl und Echozelle. Abb. zur Verfügung gestellt von J. Fuchsberger, TU Graz.

Das Radar sendet einen Impuls der Dauer  $\tau$  [s] und der Leistung  $P_t$  [W] aus. Der Impuls soll einerseits von langer Dauer sein, um viel Energie auszusenden, andererseits muss der Impuls kurz sein, um eine gute räumliche Auflösung zu erreichen. Üblicherweise haben Radars eine gemeinsame Antenne zum Senden und Empfangen der Signale. Während der Impuls gesendet wird, ist der Empfangszweig ausgeschaltet, um ihn vor Überlastung zu schützen. Daraus ergibt sich die (theoretische) minimale Messtfernung. Ein Signal kann frühestens empfangen werden, wenn das Sendesignal die Antenne verlassen hat und auf Empfang umgeschaltet wurde.

$$r_{min} = \frac{\tau \cdot c}{2} \quad [m] \quad (3.1)$$

Mit  $r_{min}$  [m] bezeichnet man den Radius um das Radar, der nicht beobachtet werden kann<sup>3</sup>, und  $c$  [ $\frac{m}{s}$ ] steht für die Lichtgeschwindigkeit. Die Division durch zwei ergibt sich aufgrund von Hin- und Rückweg. In der Praxis ist  $r_{min}$  viel größer (etwa 4-5 mal  $\tau$ ), wegen der Erholzeit der aktiven Rx-Komponenten.

<sup>3</sup> Der Vergleich mit Gleichung 3.2 wird zeigen, dass dieser Abstand genau der Länge einer Echozelle entspricht, wenn die Zeit zum Umschalten zwischen Sende- und Empfangszweig nicht berücksichtigt wird.

Die maximale Messentfernung (oder Reichweite) des Radars hängt unter anderem von der Wartezeit zwischen den ausgesandten Pulsen ab (PRT - Pulse Repetition Time). Trifft ein Signal nach der Empfangszeit auf die Antenne, bleibt es entweder unentdeckt, da gerade gesendet wird, oder es erreicht das Radar in der nachfolgenden Empfangszeit, was zu Messfehlern<sup>4</sup> führt. Eine starke Reflektivität in großer Entfernung erhöht die Reichweite eines Radars, da mehr Energie gestreut wird. Die maximale Messentfernung kann jedoch nicht erreicht werden, wenn in der (nahen) Atmosphäre sehr starke Dämpfung herrscht, da die weiter entfernt gestreuten Signale zu schwach sind, wenn sie zum Radar zurückgelangen. Die minimal benötigte Empfangsleistung des Radars ist ein wichtiges Maß für die Reichweite.

Zwischen  $r_{min}$  und  $r_{max}$  werden die Bereiche entlang des Radarstrahls in Echozellen (engl. Range Gates) unterteilt. In Abbildung 3.1 ist eine Echozelle – als Impulsvolumen bezeichnet – dargestellt. Die Länge dieser Zellen wird mit  $\frac{h}{2}$  [m] bezeichnet und ergibt sich aus:

$$\frac{h}{2} = \frac{\tau \cdot c}{2} \quad [m] \quad (3.2)$$

Die Strahlbreite ist von der Entfernung zum Radar und vom Antennenöffnungswinkel abhängig. Der Radarstrahl hat bei  $1^\circ$  Öffnungswinkel in 10 km Entfernung vom Standort einen Durchmesser von 170 m, in 76,8 km Entfernung<sup>5</sup> bereits 1340 m (Randeu 2010). Je nach Entfernung werden also verschieden große Volumina betrachtet.

$$V \approx \frac{h}{2} \cdot \frac{r_0^2 \cdot \Delta\Theta_3^2 \cdot \pi}{4} \quad [m^3] \quad (3.3)$$

$\Delta\Theta_3$  bezeichnet die 3-dB-Antennenstrahlbreite in rad,  $r_0$  steht für die Entfernung der Echozelle vom Radar. Innerhalb dieses Volumens wird die elektromagnetische Strahlung von allen Teilchen gestreut. Die Stärke der Streuung hängt von der Größe und vom Material der Partikel ab.

Wenn die Hydrometeore kleiner als die Radarwellenlänge sind ( $\frac{\lambda}{10}$ ) und wenn ihre Gestalt als kugelförmig angenommen wird, kann Rayleigh-Streuung vorausgesetzt werden (bei den österreichischen C-Band Radars gilt das bis etwa 5 mm). Bei größeren Durchmessern muss die Mie-Streuung herangezogen werden. Die Partikel innerhalb des Volumens haben einen bestimmten Rückstreuquerschnitt  $\sigma$ . Unter Rayleigh-Bedingungen ist dieser abhängig von der Anzahl  $N$  und vom Durchmesser  $D$  der Teilchen.

$$\sigma_i = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K_0|^2 D_i^6 \quad [m^2] \quad (3.4)$$

Ein typischer Wert für die Zahl von Partikeln pro Echozelle ist jenseits von  $10^8$  (Randeu 2010).  $K_0$  ist eine Materialkonstante. Für Wasser gilt  $K_0 \approx 0,93$ , für Eis  $K_0 \approx 0,17$ . Wasser streut etwa 5 mal so stark wie Eis. Der Durchmesser der Teilchen  $D$  geht mit der sechsten Potenz in die Gleichung ein. Als Näherung für die Tropfengrößenverteilung kann Gleichung 3.5, die 2-parametrische (exponentielle) Tropfengrößenverteilung, herangezogen werden.

<sup>4</sup> Der Eindeutigkeitsbereich wurde dann verlassen.

<sup>5</sup> Das entspricht 256 Echozellen zu je 300 m.



$$N(D) = N_0 \cdot e^{-3,67 \frac{D}{D_0}} \quad (3.5)$$

Die Tropfengrößenverteilung muss bekannt sein, damit die Reflektivität  $Z$  in eine Regenrate  $R$  umgerechnet werden kann (Z-R-Beziehung). In verschiedenen Gegenden der Erde kann die Tropfengrößenverteilung extrem unterschiedlich sein, sie kann jedoch mit einem Distrometer<sup>6</sup> recht genau bestimmt werden und wird dann meist als konstant angenommen, obwohl schon innerhalb eines einzigen Regenerignisses starke Abweichungen auftreten können. Oft beginnt ein Regen mit wenigen großen Tropfen, nach einigen Minuten fallen dann viele kleine. Für Landregen in Österreich kann im Mittel  $N_0=8000$  eingesetzt werden.

*Die signifikante Abhängigkeit der Radarreflektivität von der 6. Potenz des Tropfendurchmessers zeigt folgendes Zahlenbeispiel: Ein Tropfen mit einem Durchmesser von 3 mm liefert die gleiche Rückstreuung wie 730 Tropfen mit einem Durchmesser von 1 mm bzw. wie 46.700 Tropfen mit einem Durchmesser von 0,5 mm. Dies zeigt, dass vor allem die großen Tropfen für die Radarreflektivität von Bedeutung sind, da sie wegen ihrer größeren Oberfläche die Radarsignale wesentlich stärker streuen als kleine Tropfen mit dem gleichen Wassergehalt pro Volumeneinheit.[...] Der Anteil der großen Tropfen (Anm.  $D>1$  mm,  $Z_{dr}>1$  dB, p.44) am gesamten Tropfenspektrum beträgt 0,1-1 %. (Hailzl 2004)*

All diese Annahmen und Voraussetzungen führen zum spezifischen Rückstreuquerschnitt:

$$\eta = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{\sum_V \sigma_i}{V} \quad \left[ \frac{m^2}{m^3} \right] \quad (3.6)$$

Nun ist ein Teil der Energie des ausgesandten Pulses zur Antenne zurückgekehrt. Die empfangene Leistung des Signals  $P_r$  ist bekannt. Über Sende- und Empfangszeitpunkt wird die Entfernung der Echozelle zum Radar bestimmt, Azimut und Elevation der Antenne komplettieren die räumliche Zuordnung.

### Die Wetterradargleichung

$$P_r = P_t \cdot \tau \frac{G_{max}^2 \cdot \lambda^2 \cdot c \cdot \Delta\Theta_3^2}{1024 \cdot \ln 2 \cdot \pi^2 \cdot r_0^2 \cdot L_i \cdot L_e} \cdot \eta \quad [W] \quad (3.7)$$

<sup>6</sup> Ein Gerät, das Größe und Anzahl von Regentropfen misst.

$P_r$	empfangene Echoleistung in W
$P_t$	gesendete Leistung in W
$\tau$	Impulsdauer in s
$G_{max}$	maximaler Antennengewinn
$\lambda$	Wellenlänge in m
$c$	Lichtgeschwindigkeit in $\frac{m}{s}$
$\Delta\Theta_3$	3-dB-Antennenstrahlbreite in rad
$\eta$	spez. Rückstreuquerschnitt in $\frac{m^2}{m^3}$
$r_0$	Entfernung der Echozelle in m
$L_i$	interne Verluste (>1), konst.
$L_e$	externe Verluste (>1), Dämpfung in der Atmosphäre

Die Wetterradargleichung<sup>7</sup> zeigt den Zusammenhang zwischen der Echoleistung  $P_r$  und der ausgesandten Leistung  $P_t$ . Gesucht wird die Radarreflektivität  $Z$  mit der Information über die Niederschlagsintensität. Unter den getroffenen Voraussetzungen kann  $Z$  aus dem spez. Rückstreuquerschnitt  $\eta$  berechnet werden.

$$Z = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{\sum_V D_i^6}{V} \quad \left[ \frac{mm^6}{m^3} \right] \quad (3.8)$$

Die Wetterradargleichung für  $Z$  lautet:

$$Z = \frac{P_r}{P_{tmax}} \cdot \underbrace{\frac{1024 \cdot \ln 2}{\pi^3 \cdot |K_0^2| \cdot c}}_{\text{konstant}} \cdot \underbrace{\frac{\lambda^2 \cdot L_i}{G_{max}^2 \cdot \tau_{eff} \cdot \Delta\Theta_{H3} \cdot \Delta\Theta_{V3}}}_{\text{Hardware, Frequenz}} \cdot \underbrace{r^2 \cdot L_e(r)}_{\text{Entfernung}} \quad \left[ \frac{mm^6}{m^3} \right] \quad (3.9)$$

Gleichung 3.9 (Randeu 2010) zeigt die „fluktuierende Einzel-Impuls-Reflektivität“. Üblicherweise wird  $Z$  in dB angegeben<sup>8</sup>. In Österreich unterteilt die Austro Control die gemessenen Werte in 14 Stufen (siehe Tabelle 3.1). Gleichung 3.9 zeigt die momentan erscheinende Reflektivität, diese fluktuiert mit der relativen Position der Partikel in der Echozelle zueinander und muss noch über mehrere Impulse gemittelt werden. Es können auch mehrere Echozellen zusammengezogen werden, um  $Z$  zu mitteln, wobei man dann aber an Auflösung verliert.

### Z-R-Beziehung

Die Reflektivität  $Z$   $\left[ \frac{mm^6}{m^3} \right]$  ist eine physikalische Messgröße, die meisten Anwender wollen aber die Regenrate  $R$   $\left[ \frac{mm}{h} \right]$  wissen. Es ist bekannt, dass die sehr vielen kleinen Tropfen etwa halb so viel zur Reflektivität beitragen wie die sehr wenigen großen Tropfen. Wasser, Eis und die verschiedenen Mischformen verhalten sich aufgrund der unterschiedlichen Streueigenschaften wieder unterschiedlich. Meist werden die Z-R-Beziehungen empirisch entwickelt. Einige feste Beziehungen in operationellen Netzen werden folgend aufgezählt (Randeu 2010), für die Beziehung  $Z = 200 \cdot R^{1,6}$  sind die Werte in Tabelle 3.1 gegenübergestellt.

<sup>7</sup> In Gleichung 3.7 sind einige Vereinfachungen berücksichtigt, z.B.:  $\eta = \text{konst.}$  im Beleuchtungsbereich,  $h \ll r_0$ , die Antennenkeule ist rotationssymmetrisch, die Hydrometeore sind kugelförmig, ...

<sup>8</sup>  $dBZ = 10 \cdot \log \frac{Z}{1 \frac{mm^6}{m^3}}$

Österreich	$Z = 200 \cdot R^{1,6}$	
Spanien, C-Band	$Z = 200 \cdot R^{1,6}$	
Deutschland	$Z = 206 \cdot R^{1,49}$	
Schweiz	$Z = 260 \cdot R^{1,43}$	$Z \dots [\frac{mm^6}{m^3}]$
Schweden	$Z = 200 \cdot R^{2,0}$ (Eis)	
Slowenien	$Z = 250 \cdot R^{1,6}$	$R \dots [\frac{mm}{h}]$

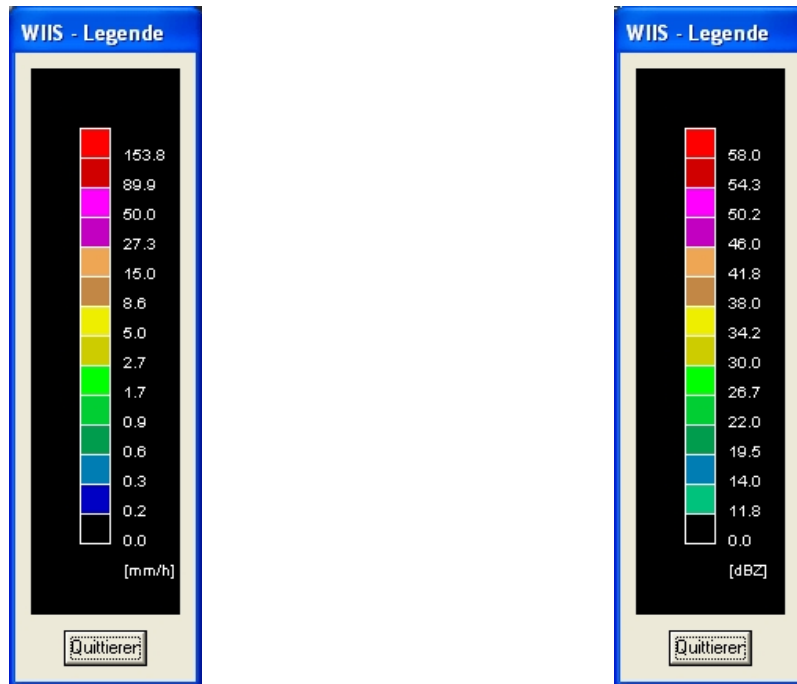


Abbildung 3.2: Einteilung der Niederschlagsraten in  $R [\frac{mm}{h}]$  bzw.  $dBZ [\frac{mm^6}{m^3}]$ . Abb. aus WIIS.

dBZ	0	11,8	14	19,5	22	26,7	30	34,2	38	41,8	46	50,2	54,3	58
R	0	0,2	0,3	0,6	0,9	1,7	2,7	5	8,6	15	27,3	50	89,9	153,8

Tabelle 3.1: Z-R Beziehung:  $Z = 200 \cdot R^{1,6}$

### Fehlerquellen

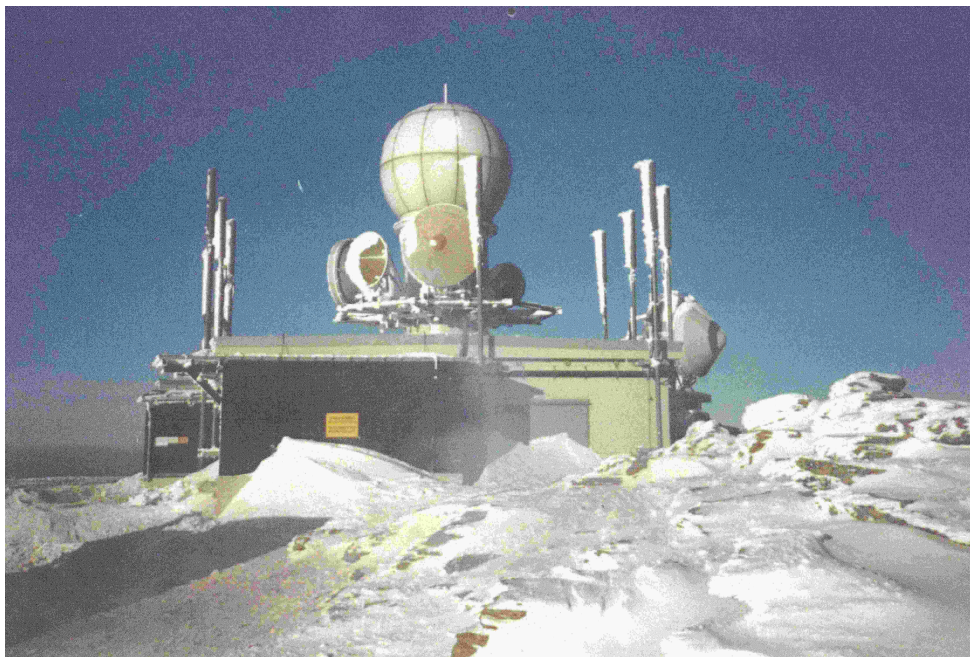
Die Reflektivität  $Z$  berechnet sich im Wesentlichen aus dem Verhältnis von gesendeter und empfangener Signalleistung sowie der Entfernung (Gleichung 3.9). Die Materialkonstante  $K_0$  wird oft mit dem Wert für Wasser vorgegeben, zwischen Wasser und Eis kann jedoch ein Unterschied von 7 dB liegen. Fest vorgegebene Z-R-Beziehungen können ebenfalls große Abweichungen verursachen, wenn nicht zwischen festen und flüssigen Niederschlagspartikeln unterschieden wird. Generell wurden bei der Herleitung der Wetterradargleichung viele Vereinfachungen getroffen, die Fehler verursachen. Außerdem treten am Radar systembedingte Fehler durch elektronische und mechanische Toleranzen auf.

### 3.1.2 Das Wetterradar der Austro Control

Die Austro Control liefert alle 5 Minuten ein Radarbild mit der Auflösung  $1 \times 1 \times 1 \text{ km}^3$ . Die vier Wetterradars bei Wien/Schwechat, Salzburg/Feldkirchen, Innsbruck/Patscherkofel und am Zirbitzkogel sind hauptsächlich für die Flugsicherung konzipiert. Für den Raum Graz ist vor allem das Radar am Zirbitzkogel von Interesse. Es handelt sich hierbei um ein C-Band-Dopplerradar mit einer maximalen Reichweite von ca. 200 km. Leider ergibt sich durch den hohen Standort des Radars von 2372 m ü.d.M. eine Radaruntergrenze von 2000 m bis 4000 m in dem untersuchten Gebiet rund um Graz und Umgebung, d.h. unterhalb dieser Grenze liegen keine Radardaten über tatsächliche Niederschläge vor.

Standort: Zirbitzkogel, Steiermark  
Geographische Länge:  $14,560^\circ$  Ost  
Geographische Breite:  $47,042^\circ$  Nord  
Höhe: 2372 m

Frequenz des Primärstrahls: 5600 MHz  
Leistung: 250 kW



**Abbildung 3.3:** Das Radar am Zirbitzkogel, Abb. der Austro Control. Gut erkennbar ist das Radom<sup>9</sup>, das die Antenne vor Witterungseinflüssen schützt.

<sup>9</sup> Radom: Kunstwort aus engl. Radar und Dome

### 3.1.3 Das Radar auf der Reicherhöhe

Das Radar auf der Reicherhöhe wird von der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft betrieben. Es besteht seit dem Jahr 2003 und liefert ca. alle drei Minuten ein neues Bild. Bei 2,7° Elevation werden automatisch PPI-Scans generiert, zusätzlich können manuell vertikale Schnitte (RHI) angezeigt werden. Leider wird die Anlage nur bei Bedarf eingeschaltet, deshalb sind keine durchgehenden Datensätze vorhanden.

Von der Homepage der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft (<http://hagelabwehr.at/>) wurden die folgenden Daten übernommen:

Standort: Reicherhöhe, Gemeinde Übelbach (Planquadrat 16 im WIIS)

Geographische Länge: 15° 14' 42,01" Ost

Geographische Breite: 47° 14' 18,22" Nord

Höhe über NN<sup>10</sup> ca. 1100 m

Typ Advanced Weather Radar System AWRS 2001C-D C-band Doppler-Radar

Hersteller GVD d. o. o., Goricane 8D, 1215 Medvode, Slowenien

Frequenzbereich 5400 - 5700 MHz

Antenne Durchmesser 2,56 m, 0 - 10 Umdrehungen pro Minute

Polarisation: horizontal, vertikal

Messradius bis zu 100 km

Empfänger Digital Doppler Receiver RVP7

Videoprozessor Doppler Radar Video Processor RVP7

Software SUPRAS 7 RC (remote control)

Steuerpulte Hauptkonsole beim Radar und Fernbedienungskonsole am Flugplatz Weiz in Unterfladnitz

## 3.2 Positionsdatenerfassung der Flugzeuge

Seit 2009 sind die drei Flugzeuge der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft sowie das Flugzeug der Firma HailAir mit GPS-Sendern ausgestattet. Alle zehn Sekunden werden Position, Höhe, Geschwindigkeit und Kurs übermittelt. Zusätzlich kann der Pilot noch den Einsatz von Brenner und Fackeln melden. Abbildung 3.4 zeigt zwei Flugzeuge im Einsatz. Die Positionen der letzten 8 Minuten werden als Flugspur dargestellt. Das gelbe Ende zeigt die aktuelle Position. Die Flugzeugkennungen lauten bei der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft DDV, KGM, KGO und bei der HailAir DON.

---

<sup>10</sup> Normal Null - mittlerer Meeresspiegel

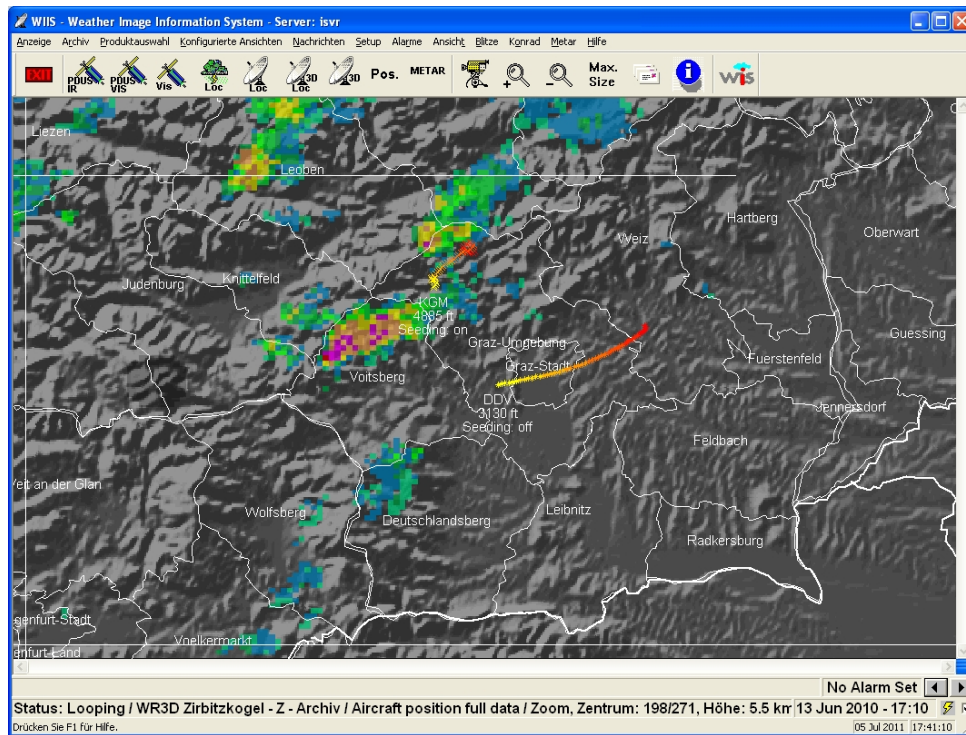


Abbildung 3.4: 13.6.2010: Die Flugzeuge KGM und DDV im Einsatz. Abb. aus WIIS.

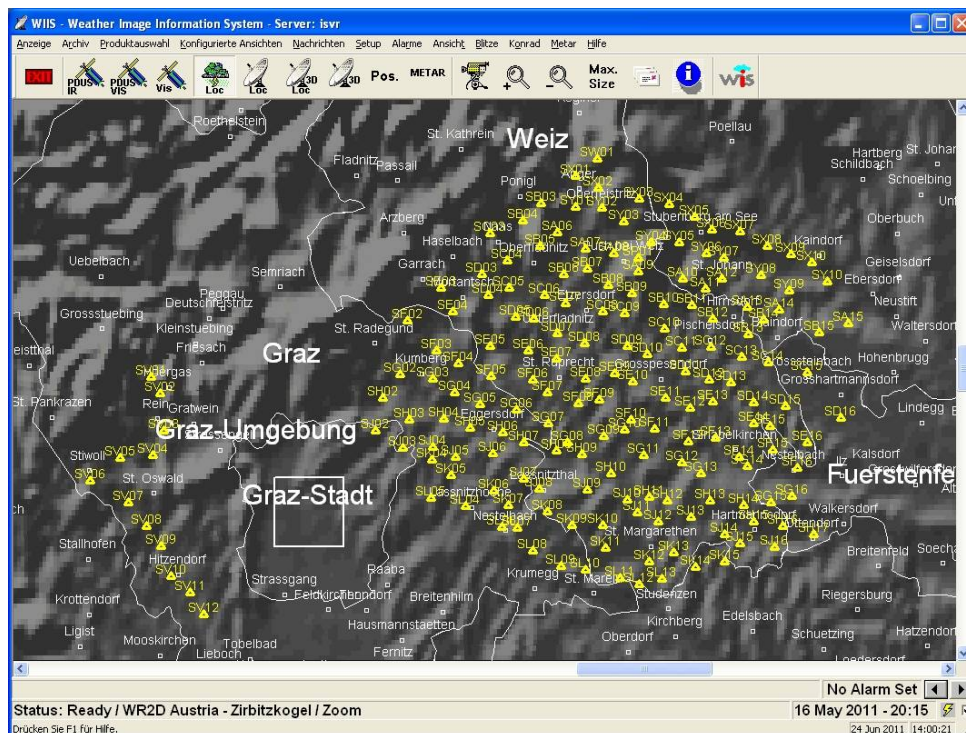
### 3.3 Hageltestplatten

Seit 1982 sind unter der Leitung von Dr. Otto Svabik (ZAMG Wien) Hageltestplatten (HTP) im Großraum Gleisdorf-Weiz aufgestellt. Jede Station besteht aus 5 Schaumpolystyrol-Platten (Styroporschaum „Roofmate“) mit den Abmessungen  $33 \times 30 \times 2 \text{ cm}^3$  (Fläche  $0,1 \text{ m}^2$ ). Vier sind nach den Himmelsrichtungen ausgerichtet, die fünfte liegt waagrecht (Abb. 3.5). Heute bestehen 181 Stationen mit einem mittleren Abstand von etwa 2 km. Abbildung 3.6 zeigt die Lage und die Bezeichnung der Hageltestplatten. Die Auswertung der getroffenen Platten liefert die Anzahl und den Durchmesser der eingeschlagenen Hagelkörner. Außerdem wird der Einfallswinkel und die Summe der kinetischen Energie ( $\frac{J}{\text{m}^2}$ ) aller Eiskörner zum Zeitpunkt ihres Auftreffens angegeben (vgl. Svabik 2001). Die Hageltestplatten sind sehr hilfreich, um Hagelereignisse an einem Ort zu bestätigen oder festzustellen, dass kein Hagel am Boden auftrat. Auch die Erkenntnis, dass kein Hagel stattgefunden hat, kann von großem Interesse sein. Leider wird keine Uhrzeit zu den Einschlägen geliefert, sodass es teilweise schwer fällt die hagelverursachenden Zellen zuzuordnen. Üblicherweise ziehen mehrere Zellen zeitlich versetzt über eine getroffene Hageltestplatte. Welche davon Hagel am Boden verursachten und welche nicht, ist oft nicht festzustellen.





**Abbildung 3.5:** Hageltestplatte im Raum Gleisdorf-Weiz, vier nach den Himmelsrichtungen ausgerichtete vertikal befestigte Platten und eine Deckplatte. Foto von Otto Svabik.



**Abbildung 3.6:** Position und Bezeichnung der Hageltestplatten im Raum Gleisdorf-Weiz. Sämtliche HTP liegen innerhalb des betreuten Gebietes durch die Steirische Hagelabwehrgenossenschaft (vgl. Abb. 2.2), die Auswertung dieser Hageltestplatten wird in Kapitel 5.4 besprochen. Abb. aus WIIS.

### 3.4 Satellitenbilder

Meteosat<sup>11</sup> ist ein geostationärer Wettersatellit in ca. 36.000 km Höhe über dem Äquator im Golf von Guinea (0° Nord, 0° Ost). Er wird von der europäischen Organisation EUMETSAT betrieben. Meteosat-1 startete 1977, Meteosat-9 im Jahr 2005. Die Position ist für die Wetterbeobachtung über Afrika, dem östlichen Atlantik und Südeuropa geeignet. Der Satellit liefert Bilder im IR-Bereich und im visuellen Bereich. Er kann die Temperatur der Wolkenobergrenze bestimmen. Diese Temperatur kann einerseits ein Anzeichen für einen hochreichenden Wolkenturm sein, andererseits auch lediglich die niederen Temperaturen in der Atmosphäre wiedergeben. Die Kombination mit Radardaten bringt Aufschluss über die Höhe der Wolken. Die Bilder werden alle 30 Minuten erneuert und liefern eine Auflösung von ca. 5x5 km<sup>2</sup>.

Für die Hagelabwehr sind die Temperaturen unter 0 °C interessant, diese sind in Tabelle 3.2 aufgelistet.

°C	+3	0	-3,5	-7	-10	-13,5	-17,5	-21	-24,5
----	----	---	------	----	-----	-------	-------	-----	-------

-28,5	-32	-36	-40	-43,5	-47,5	-51,5	-55,5
-------	-----	-----	-----	-------	-------	-------	-------

**Tabelle 3.2:** Temperaturstufen in °C der IR-Messung von Meteosat.

### 3.5 Messungen in der Atmosphäre

Am Flughafen Graz-Thalerhof wird jeden Morgen um 3:00 UTC ein Wetterballon mit einer Radiosonde gestartet. Unter anderem werden Luftdruck, Höhe, Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit gemessen. Die University of Wyoming betreibt eine Homepage, auf der man diese Werte abrufen kann. Die Stationsnummer für Graz-Thalerhof ist 11240. (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> - Stand: 5.4.2011)

Für die Zwecke der Hagelabwehr sind besonders die Höhe der 0-°C-Grenze sowie die Höhe der -20-°C-Grenze interessant. Beispielsweise liegen diese am 13. 6. 2010 bei ca. 4000 m bzw. ca. 7000 m. Die Messungen finden nur all 24 h statt, für das Einsatzgebiet der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft und der HailAir können unter normalen meteorologischen Voraussetzungen diese Höhen jedoch für 24 h als konstant angenommen werden. Der Ballon erreicht eine Höhe von fast 24.000 m, bevor er aufgrund des niederen Luftdrucks zerplatzt.

Die gesamten Messwerte des 13. 6. 2010 finden sich in Anhang A.

<sup>11</sup> engl. Meteorological Satellite



### 3.6 Blitzortungssystem ALDIS

Das Blitzortungssystem ALDIS (Austrian Lightning Detection & Information System) zeichnet alle Blitzeinschläge in Österreich auf. Die Ortung weist eine Genauigkeit von wenigen 100 m auf. Dokumentiert werden neben den Einschlagkoordinaten noch Uhrzeit, Polarität und die Blitzstromamplitude. Acht Sensoren bestimmen dazu den Feldeinfallwinkel und den exakten Zeitpunkt eines Ereignisses. Daraus werden die oben genannten Daten ermittelt. Die ALDIS-Daten können möglicherweise bei der Erstellung von Zugpfaden hilfreich sein (vgl. Wakonigg, Mayer 2005). Die Steiermark ist in Österreich das Bundesland mit den meisten aufgezeichneten Blitzeinschlägen. 2001 wurden etwas mehr als 29.000 Blitze registriert, 2009 mehr als 92.000. Das Mittel liegt bei etwa 40.000 Blitzortungen pro Jahr ([www.aldis.at](http://www.aldis.at)). Die Monate mit den meisten Blitzen sind Juni, Juli und August (Wakonigg). Da Hagel immer in Verbindung mit (starken) Gewittern auftritt, sind die Daten des ALDIS-Blitzortungssystems von Interesse für eine aktive Hagelabwehr.

### 3.7 Weitere Quellen

Für die Entwicklung von Hagelprognose-Werkzeugen ist es notwendig, vergangene Wettersituationen zu überprüfen. Hierfür müssen Informationen über Ort und Zeit von Hagelereignissen vorliegen. Mit den Hageltestplatten in der Region Gleisdorf-Weiz werden seit 1982 solche Aufzeichnungen geliefert. 181 HTP-Stationen sind seit über 20 Jahren im Einsatz (es werden jedoch nur relativ wenige getroffen). Als zusätzliche Quelle für Hagel am Boden sind Meldungen von Versicherungen oder Medien wie Zeitung oder Fernsehen sehr hilfreich. Oft enthalten diese Quellen Angaben zu den Größen der Hagelkörner, zu Zeitspanne und genauem Ort des Hagelereignisses. In der Steiermark werden auch sogenannte Hagelmeldkarten eingesetzt, diese werden von Freiwilligen ausgefüllt und enthalten Zeit, Ort, Dauer und Hagelkorngröße (Abb. 3.7). Als zusätzliche Informationsquelle sind alle glaubwürdigen Stellen willkommen. Zusätzliche Detailinformationen über das Hagelereignis, wie Zeitspanne, Hagelkorngröße, Temperatur, usw. können sehr hilfreich sein.

Hagelmeldungen aus Medien sind auf Glaubwürdigkeit zu überprüfen, besonders wenn keine Bild- oder Filmaufnahmen vorliegen. Versicherungsmeldungen sind oft zeitlich ungenau und es werden meist nur die betroffenen Gemeinden bekanntgegeben. In Österreich sind die Gemeinden flächenmäßig meist relativ klein, es kann aber durchaus vorkommen, dass es schwer fällt, die hagelverursachende Zelle ausfindig zu machen. Am 13. 6. 2010 wurde in 29 Gemeinden Hagel gemeldet. Anhand von Radardaten konnte in 13 Fällen eindeutig die hagelverursachende Zelle zugeordnet werden. In 12 Gemeinden kommen zwei Zellen in Frage, in drei Gemeinden sind drei Zellen möglich und in je einer Gemeinde kommen gar vier bzw. 5 Gewitterzellen in Frage (Tabelle 3.3). Leider wurden am 13. 6. 2010 keine Hagelmeldkarten ausgefüllt. Sie hätten möglicherweise den Zeitraum des Hagelereignisses so genau angegeben, dass die Zellenzuordnung gelungen wäre.

Die gesamte Auswertung dieser Zellenzuordnung findet sich in Anhang B.

**Hagel-Schadensmeldung** Teststation Nr. L 10

Name-Ort: Leopoldsdorf Gemeinde: St. Margarethen/Reith

Nach dem Gewitter am 15 August 2010, 0 30 Uhr  
 ( Tag , Monat )

konnten am Hageltestgerät Einschläge durch Hagelschloßen festgestellt werden,  
 Hagelschläge von 0 30 Uhr bis 0 35 Uhr

**Geschätzte Schlossengröße vergleichbar angeben:**  
 ( z.B. Reis, Erbsen, Marillenkerne, Nußkern oder Eigrösse ) .....

**Angaben über Beschaffenheit der Hagelkörner:**  
 ( z.B. wässrig, trocken, weich, schneematschig usw. ) .....

Getroffene Hageltestplatten gleich an  
**Herrn Dr. Otto Svawbik, Postfach 1, 2103 Langenzersdorf senden !**

Ich bitte um Zusendung von \_\_\_\_\_ Stück Hageltestplatten

**Abbildung 3.7:** Hagelmeldekarte der ZAMG.

Zahl der in Frage kommenden hagelverursachenden Zellen	5	4	3	2	1
Zahl der betroffenen Gemeinden	1	1	3	11	13

**Tabelle 3.3:** Konvektive Zellen werden von Hagel getroffenen Gemeinden zugeordnet. Teilweise kommen mehrere Zellen in Frage.

### 3.8 Weather Image Information System (WIIS)

Das Programm WIIS wurde an der TU Graz entwickelt und stellt ein Spezialprodukt auf dem Sektor der Wetterinformation und Wetterfrühwarnung dar. Es kann die aktuellsten Satellitenbilder, Wetterradar-bilder, Blitzortungsdaten und allgemeine Daten aus meteorologischen Informationssystemen darstellen und Frühwarnungen ausgeben, wenn Grenzwerte überschritten werden. Besonders die 3D-Darstellung der konvektiven Zellen ist für die Hagelabwehr von großer Bedeutung. ([www.wetterradar.at](http://www.wetterradar.at))

Im Rahmen dieser Arbeit wurde als zusätzliches Overlay die räumliche Anordnung der Hageltestplatten samt Bezeichnung erstellt. Dieses Overlay ist unter dem Namen HTP STK 2007 abgespeichert.

### 3.9 Fehlerquellen

Die Qualität von Radardaten wird durch einige Umstände beeinflusst. Beispiele sind die relative Position des Radars zum Niederschlag, die Radar-Untergrenze, Bodenechos (Groundclutter) oder Abschattung. Die Tropfengrößenverteilung ist ein entscheidender Faktor bei der Umrechnung der Reflektivität in eine Regenrate. Diese Verteilung wird möglicherweise durch Seeding beeinflusst. Dadurch, dass die Z-R-Beziehung fest vorgegeben ist, kann es bei Gewittern zu falschen Darstellungen der Regenrate kommen. Generell werden beim Radar eine Vielzahl von Annahmen, Einschränkungen und Kompromissen getroffen.

Die unterschiedlichen Radarbild-Darstellungen im WIIS weisen Abweichungen auf. Die Maximalwert-Projektion in der 2D-Ansicht wird direkt aus den Radarrohdaten erstellt. Sie kann aufgrund der höheren vertikalen Auflösung bei der Berechnung der Reflektivitäten Werte anzeigen, die in der 3D-Ansicht nicht zu finden sind.

Die Positionsdaten der Flugzeuge können als räumlich hinreichend genau angenommen werden, jedoch muss der Einsatz von Brenner und Fackeln noch manuell eingegeben werden. Es kann vorkommen, dass der Brenner zwar in Betrieb ist, im Protokoll aber die Null für „Seeding: OFF“ vermerkt ist. Man kann davon ausgehen, dass immer wenn sich die Flugzeuge in der Nähe von Gewitterzellen aufhalten auch Seeding betrieben wird. Bei einer automatisierten Auswertung muss das kontrolliert werden.

Die HTP in der Region Gleisdorf-Weiz sind etwa alle 2 km aufgestellt, da Hagelzugbahnen aber oft nur wenige hundert Meter breit sind ist es durchaus möglich, dass einige Hagelereignisse nicht aufgezeichnet werden. Weiters wird das Netz der Hageltestplatten von Freiwilligen betreut. Es kann daher nicht ausgeschlossen werden, dass sich an einem Tag, an dem ein Hagelereignis gemeldet wird, bereits eine gewisse Anzahl von Hagelkornabdrücken von früheren Tagen auf der Testplatte befindet, an denen aber die Testplatte nicht überprüft worden ist.

## Kapitel 4

# Differenzierung zwischen Regen- und Hagelzellen

Das Ziel bei der Erkennung von Hagelzellen lautet: Alle Gewitterzellen, die Hagel am Boden verursachen, müssen erkannt werden. Die Schwierigkeit dabei ist es, wirklich nur jene Zellen als Hagelzellen zu deklarieren, die auch Hagelschäden verursachen können. Es ist ein Leichtes zu sagen, alle Wolken mit einem Durchmesser von mehr als 100 m wären potentielle Gewitterwolken, denn diese Definition würde sicherlich 100 % der Gewitterwolken einschließen. Immer wenn potentielle Hagelzellen erkannt werden, sollen diese in geeigneter Weise behandelt werden und es ist weder sinnvoll noch möglich, alle Wolken am Himmel zu bekämpfen. Entscheidend ist also alle Hagelzellen zu erkennen, doch soll die Abgrenzung zu starken Regenzellen möglichst genau erfolgen, um nicht unnötigerweise Wolken zu behandeln, die ohnedies nur Regen bringen. Das Thema „Seeding“, also das Behandeln der Wolken, wird in Kapitel 2.6 behandelt. Eine Vorhersage der Hagelwahrscheinlichkeit erlaubt aktive und passive Gegenmaßnahmen in Gang zu setzen. Üblicherweise wird diese Vorhersage durch Extrapolation von Radardaten berechnet (Wilson et al. 1998, Wieringa und Holleman 2006).

Die vorhandenen Datenquellen wurden bereits in Kapitel 3 erläutert. Es gilt eine Möglichkeit zu finden, um Gewitter voraussagen zu können. Hierfür müssen verschiedene Daten ausreichend aktuell vorliegen. Bereits in einer frühen Entwicklungsphase soll zwischen Regen- und Hagelzellen unterschieden werden können. Auf diese Weise kann sichergestellt werden, dass alle Hagelwolken behandelt werden und dass kein Seeding-Material verschwendet wird, indem es in Regenwolken ausgebracht wird. Ob einzelne Daten eines Wetterradars, der Temperaturverlauf, die Windrichtung oder die Anzahl der Sonnenstunden des jeweiligen Tages für eine Vorhersage herangezogen werden oder eine Kombination daraus, spielt keine Rolle. Wenig überraschend hat sich besonders das Wetterradar bewährt. Die weiter unten vorgestellten Methoden basieren alle auf Messwerten die mittels Radar gewonnen werden.

Nachdem Gewitter im Allgemeinen räumlich eher beschränkte meteorologische Systeme darstellen, sind Standardbeobachtungsmethoden und -instrumente meist nicht in der Lage, alle Ereignisse aufzuzeichnen. Für die Entwicklung eines Hagel-Vorhersageprodukts ist es notwendig, vergangene Wettersituationen zu untersuchen und Parameter zu finden, die eine Unterscheidung zwischen Regen- und Ha-

gelwolken ermöglichen. Dazu ist es wiederum notwendig, Zeit und Ort von Hagelereignissen zu kennen. Ebenso müssen verlässliche Angaben von Ereignissen ohne Hagel vorliegen. Wenn Hagel auftritt, aber kein Schaden entsteht, erfährt man meist nichts davon. Zur Dokumentation von Hagelereignissen am Boden dienen Versicherungsdaten und auch solche von Hageltestplatten<sup>1</sup>.

Momentan werden hauptsächlich Wettarradars mit Wellenlängen zwischen 3 cm und 10 cm eingesetzt (X-, C-, S-Band). Oft können diese Geräte als zusätzliche Funktion die Geschwindigkeit der Hydrometeore<sup>2</sup> in radialer Richtung zum Radarstandort bestimmen (Doppler-Funktion). In Zukunft werden doppelt polarisierte Radars eingesetzt. Von diesen Anlagen erwartet man sehr große Fortschritte im Bereich der Hagelabwehrforschung, da sie bereits in der Atmosphäre zwischen Regen und Hagel unterscheiden können<sup>3</sup>. Sie messen sowohl die horizontale-, als auch die vertikale Reflektivität und bilden so eine differentielle Reflektivität  $Z_{dr}$ . Hagelkörner sind immer ziemlich kugelförmig, wodurch  $Z_{dr}$  immer bei etwa 0 dB liegt,  $Z_h$  aber einen hohen Wert annimmt. Regentropfen sind abgeflacht, so liefert  $Z_h$  einen großen Wert,  $Z_v$  hingegen einen niedrigen.  $Z_{dr}$  ist dadurch  $> 0$  dB und man kann Regen von Hagel unterscheiden. Dadurch wird zwar das Problem der späten Erkennung von Hagel nicht gelöst, denn wenn Hagel erst einmal ausgebildet und mit dem Radar messbar ist, dann kommt jede Bekämpfung zu spät, man kann aber die Wolken genauer darstellen, und auf diese Weise getroffene Maßnahmen besser verfolgen. So erwartet man neue Erkenntnisse in der Hagelabwehr. Für diese Arbeit liegen noch keine Messdaten von doppelt polarisierten Wettarradar-Anlagen vor, sodass auf diese Technik nicht weiter eingegangen wird. Die gängigsten Methoden zum Aufspüren von Hagelzellen werden in den folgenden Unterkapiteln vorgestellt.

### 4.1 Literaturrecherche

Bei der Literaturrecherche wurde auf bestmögliche Vollständigkeit geachtet. Es wurde gezielt nach Literaturstellen von bereits bekannten Werken gesucht. Der Schwerpunkt lag aber in der Suche mit Schlagworten in verschiedenen Datenbanken. Unter anderen wurden die Datenbanken von American Meteorological Society, IEEE, Compendex, Scopus und der Verbundkatalog der österreichischen Universitäten durchsucht. Diese beinhalten die bekanntesten meteorologischen Zeitschriften wie Bulletin of the American Meteorological Society, Journal of Applied Meteorology and Climatology, Journal of the Atmospheric Sciences, Monthly Weather Review, Meteorological Monographs - uvm. Die in der vorliegenden Arbeit verwendete Literatur stammt aus vielen Teilen der Welt, von Nord- und Südamerika über Europa, Südafrika, Asien bis nach Australien und Neuseeland. In China wird Hagelabwehr in großem Umfang betrieben, doch ist es oft schwierig englischsprachige Literatur zu bekommen. Die untersuchten Texte wiederholen sich inhaltlich und in Bezug auf Literaturstellen ständig, sodass man von Vollständigkeit in Bezug auf die Literaturrecherche ausgehen kann.

Nach Durchsicht der Literatur wurde entschieden die folgenden Methoden zur Differenzierung zwischen Regen- und Hagelzellen vorzustellen.

---

<sup>1</sup> vgl. Kapitel 3.3

<sup>2</sup> Regentropfen, Graupel, Hagelkörner

<sup>3</sup> vgl. NRC p.47

## 4.2 CAPPI, maxPPI

CAPPI steht für *Constant Altitude Plan Position Indicator* und bedeutet, dass in einer konstanten Höhe (z.B. 3000 m ü.d.M.) die Reflektivität an einem PPI-Scope angezeigt wird. Betrachtet man eine relativ geringe Höhe, z.B. die der Null-Grad-Isotherme, so spricht man auch von „low level CAPPI“. Sehr nahe beim Radar (und in großer Entfernung) wird oft nicht in jeder Elevation gescannt. So ist es nicht üblich mit 90° Elevation zu arbeiten, was dazu führt, dass oberhalb des Radars keine Messdaten vorliegen. Ähnliches gilt für bodennahe Gebiete in einiger Entfernung vom Radar. Diese Lücken können von benachbarten Radaranlagen oder mathematisch durch Interpolation geschlossen werden. Ebenso besteht die Möglichkeit, einfach den am nächsten gelegenen Wert zu verwenden, d.h. wenn der Wert für 3000 m Höhe nicht vorliegt nimmt man z.B. den Wert von 4000 m Höhe an der gegebenen Stelle. In diesen Fällen spricht man auch von „pseudoCAPPI“<sup>4</sup>. Geht man davon aus, dass die zu messenden Partikel wesentlich kleiner sind als die Wellenlänge des Radars, so gilt die Rayleigh-Streuung und der Durchmesser der Partikel geht zur sechsten Potenz in die Reflektivität  $Z$  ein:  $Z \approx \sum D_i^6$  (vgl. Gleichung 3.8). Hagelkörner erreichen größere Durchmesser als Regentropfen. Eine Reflektivität von 55 dBZ entspricht einer enormen Regenrate<sup>5</sup>. Ein derart starker Regen ist sehr selten, sodass es sich sehr wahrscheinlich um Hagel handelt. Auf diese Weise kann man sagen, dass für alle Werte von  $Z > 55$  dBZ eine hohe Hagelwahrscheinlichkeit gilt.

Als „maxPPI“ wird oft eine Maximalwert-Projektion von der Radaruntergrenze bis zur Wolkenobergrenze bezeichnet (z.B. WR-2D-Ansicht im WIIS). Durch diese einfache Erweiterung wird nicht mehr der Wert einer bestimmten Höhe als Kriterium herangezogen, sondern der höchste gemessene Wert zwischen einer minimalen- und einer maximalen Höhe über Grund. Das Kriterium lautet wieder: Wird ein gewisser Wert (z.B. 55 dBZ) überschritten, so gilt eine bestimmte Hagelwahrscheinlichkeit.

## 4.3 Das sowjetische Seeding-Kriterium (1967)

Das sowjetische Seeding-Kriterium wurde in den 1960er Jahren empirisch entwickelt und basiert hauptsächlich auf den geometrischen Eigenschaften der Wolke wie z.B. der Höhe des Wolkenturms  $H_v$  über Meereshöhe (mean sea level - msl), der Höhe der maximalen Reflektivität  $H_{zm}$  oder dem Verhältnis zwischen warmen und kalten Gebieten in der Wolke  $\frac{H_-}{H_+}$ . Der kalte Teil ist der Unterschied zwischen  $H_v$  und der Höhe der 0-°C-Grenze  $H_0$ . Der warme Teil einer Wolke entspricht dem Unterschied zwischen  $H_0$  und der Höhe der Wolkenbasis  $H_b$ . Weitere Parameter sind die Temperaturen bei  $H_v$  und  $H_{zm}$  ( $T_v$  und  $T_{zm}$ ) und die maximale Radar-Reflektivität  $Z_m$ . Es gibt noch weitere sowjetische Hagelabwehrprojekte, die ein wenig abgeänderte Parameter verwenden, das Grundprinzip ist aber das gleiche (Waldvogel et al. 1979). Alle Höhen werden mit einem 3-cm-Radar (X-Band) gemessen.  $H_0$ ,  $H_b$  sowie die notwendigen Temperaturen werden von einer Radiosonde (an einem Wetterballon) ermittelt. Diese Werte werden anhand von empirisch entwickelten Tabellen in eine komplexe Hagelwahrscheinlichkeit  $P$  transformiert.

<sup>4</sup> vgl. Holleman 2001

<sup>5</sup> abhängig von der Z-R Beziehung, siehe Kapitel 3.1.1

$$P = P(H_v, T_v, H_{zm}, T_{zm}, \frac{H_-}{H_+}, Z_m) \quad (4.1)$$

Das sowjetische Seeding-Kriterium besagt, dass eine Zelle geimpft werden soll, wenn (und solange) jede der drei folgenden Bedingungen erfüllt ist:

$$P \geq 50 \%, \quad H_{zm} \geq H_0, \quad Z_m \geq 45 \text{ dBZ} \quad (4.2)$$

Anhand dieser drei Forderungen kann man **alle** (Waldvogel et al. 1979) Hagelzellen aufspüren, allerdings sind etwa 50 % davon nur starke Regenzellen, die keinen Hagel am Boden verursachen.

#### 4.4 Das Waldvogel-Kriterium (1979)

Sowjetische Wissenschaftler erklärten, dass sie in der Lage wären, sowohl alle hagelbringenden Wolken zu erkennen, als auch den richtigen Zeitpunkt und Ort zum Einbringen des Seeding-Materials zu kennen. Von 1977-1981 wurde in der Zentralschweiz der sogenannte „Grossversuch IV“ durchgeführt. Die schweizer Wissenschaftler setzten dabei sowohl sowjetische Raketen als auch sowjetische Radaranlagen ein, um möglichst die gleichen Bedingungen wie bei den Versuchen in der Sowjetunion vorzufinden. Ziel der Untersuchungen war es, die Gültigkeit des sowjetischen Seeding-Kriteriums zu bestätigen oder zu widerlegen. Die Studie verglich Bodenbeobachtungen eines Hageltestplattennetzes mit Messungen eines 3-cm-Radars (X-Band). Die Frage des richtigen Seedingzeitpunktes und -ortes wurde zu diesem Zeitpunkt nicht beantwortet. Die Untersuchungen in der Schweiz zeigten aber, dass das sowjetische Seeding-Kriterium die Forderung erfüllt, alle Hagelzellen in einem frühen Entwicklungsstadium zu erkennen. Waldvogel et al. (1979) vereinfachten das sowjetische Kriterium zu:

$$H_{45} \geq H_0 + 1,4 \text{ km} \quad (4.3)$$

Mit  $H_{45}$  bezeichnet man die obere Grenze des Bereiches in einer Wolke mit einer Reflektivität von 45 dBZ.  $H_0$  steht für die Höhe der 0-°C-Isotherme. *Es besteht eine gewisse Hagelwahrscheinlichkeit, wenn die Höhe des 45-dBZ-Echos mindestens 1,4 km über der Null-Grad-Grenze liegt.* Wie schon das sowjetische Seeding-Kriterium kann auch das „Waldvogel-Kriterium“ (Glg. 4.3) alle Hagelzellen in einem frühen Entwicklungsstadium aufspüren, benötigt dafür aber nur zwei Parameter und zeigt sogar eine etwas bessere Unterscheidung zwischen Regenzellen und Hagelzellen. Nach wie vor produzieren jedoch etwa 50 % der Wolken, auf die das Kriterium zutrifft, keinen Hagel am Boden.

Waldvogel ermittelte mit Radiosonden die Höhe der 0-°C-Isotherme und mit einem Radar die maximale Höhe eines 45-dBZ-Echos. Daraus berechnet er eine gewisse Hagelwahrscheinlichkeit. Abbildung 4.1 zeigt die Auftrittswahrscheinlichkeit einer starken Regenzelle bzw. einer Hagelzelle anhand des Parameters  $H_{45} - H_0$ .

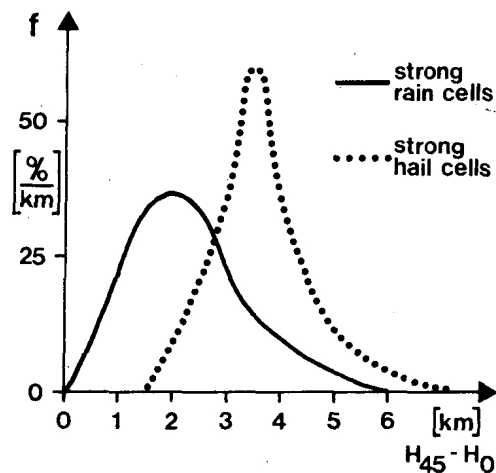


Abbildung 4.1: Wahrscheinlichkeit eines Hagelereignisses. Abb. aus Waldvogel 1979.

## 4.5 Die Methode nach Auer (1994)

Viele Methoden zum Aufspüren von Hagelzellen basieren lediglich auf dem Erkennen des Überschreitens eines Schwellwerts auf einem Radarbild; z.B. tritt Hagel auf, wenn  $Z_e > 50$  dBZ (Auer 1994). Diese einfache Methode (CAPPI, maxPPI) stellt sich als relativ schwach heraus, wenn es darum geht, Hagelzellen von starken Regenzellen zu unterscheiden. August Auer Jr. (1994) erweitert dieses Kriterium, indem er die Temperatur der Wolkenobergrenze  $T_B$  mit einbezieht. Die Temperatur erhält Auer durch Infrarotmessungen von Satelliten<sup>6</sup>, die Reflektivität  $Z_e$  von „low level CAPPIs“ in der Nähe der 0-°C-Isotherme.

Das Verfahren zur besseren Unterscheidung zwischen Regen und Hagel wurde in einer ganzjährigen Untersuchung in Neuseeland empirisch entwickelt. Wenn eine auf dem Radar nicht eindeutig zuordenbare Zelle über eine „reporting station“ zieht (und das innerhalb von 100 km Abstand zum Radar), so wird die Reflektivität in der Nähe der 0-°C-Isotherme aufgezeichnet, sowie die Temperatur der Wolkenobergrenze via Infrarot-Satellit<sup>7</sup> (IR) bestimmt. Die Temperatur der Wolkenobergrenze wird innerhalb von 30 Minuten von der Radaraufzeichnung mit einer 4-km-Auflösung ermittelt. Sie ist ein Indiz für die vertikale Ausdehnung der Wolke. Außerdem wird festgehalten, ob zu diesem Zeitpunkt Hagel am Boden auftrat oder nicht. Gelegentlich wurde die Temperatur aus der Zellenhöhe (15-dBZ-Schwellwert) mit Messungen durch nahegelegene Radiosonden bestimmt, oder damit verglichen. Man kam auf eine Übereinstimmung der Werte von  $\pm 3$  °C. Schnell anwachsende Zellen können weiter abweichen, schnell abklingende Zellen wurden in die Untersuchungen nicht mit eingebunden. Auf diese Art wurden mehr als 100 Regen- oder Hagelzellen über ein ganzes Jahr verteilt beobachtet (Auer 1994).

Abbildung 4.2 zeigt eine Verteilung von Hagelereignissen (Y) und solchen, bei denen kein Hagel auftrat (N). Als lineare Grenze zwischen (Y) und (N) findet man:  $2,6 \cdot Z_e$  [dBZ] +  $T_B > 85$  oder etwas einfacher in Näherung: „Wenn die Summe von Temperatur ( $< 0$  °C) und der doppelten Reflektivität (dBZ)

<sup>6</sup> in Europa: Meteosat

<sup>7</sup> Wellenlänge Infrarot: 10,5  $\mu\text{m}$  bis 12,5  $\mu\text{m}$



größer 60 ergibt, wird Hagel erwartet“ (Auer 1994). Die Methode nach Auer wurde in Neuseeland ein Jahr lang getestet und für wesentlich besser befunden als die herkömmliche CAPPI-Methode mit einem fixen Schwellwert. Durch die Methode nach Auer kann man zusätzlich die Hagelkorngrößen berechnen. Außerdem schlägt Auer vor „low level CAPPI“ durch „VIL“ (siehe unten) zu ersetzen, und mit der Temperatur zu vergleichen.

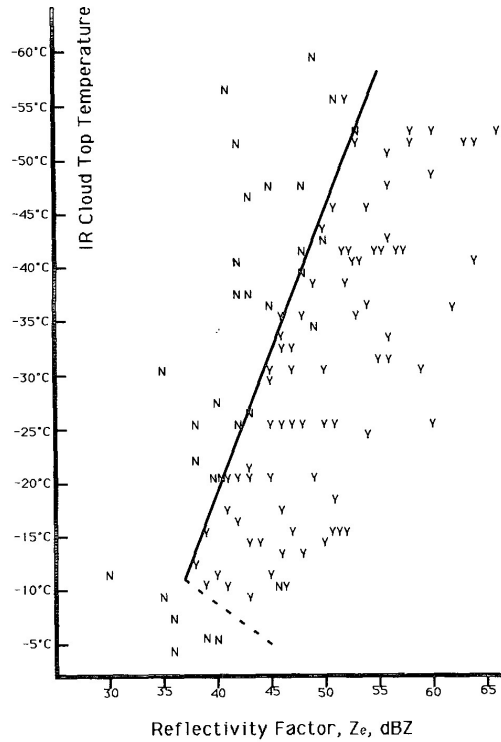


Abbildung 4.2: Unterscheidung von Regen- und Hagelzellen. Abb. aus Auer 1994.

## 4.6 Vertically Integrated Liquid Water Content - VIL (1972)

Das Konzept „VIL“ wurde von Greene und Clarke (1972) eingeführt. Die Idee ist dabei, den Wassergehalt in einer Wolkensäule zu bestimmen, d.h. von der Wolkenuntergrenze bis zur Wolkenobergrenze mit einer bestimmten Auflösung (1 km x 1 km) zu integrieren. In einem ersten Schritt wird dazu die Reflektivität jedes Radarpixels in eine Wassermenge  $M$  umgewandelt. Dies geschieht anhand der semiempirischen Beziehung

$$M = 3,44 \cdot 10^{-3} \cdot Z^{\frac{4}{7}}. \quad (4.4)$$

Diese Pixels<sup>8</sup> von Wassermengen werden anschließend an jeder Position von der Wolkenbasis bis zur Wolkenobergrenze zusammengezählt. So erhält man den Flüssigwassergehalt

$$VIL = \int_0^H M dh = 3,44 \cdot 10^{-3} \int_0^H Z^{\frac{4}{7}} dh. \quad (4.5)$$

<sup>8</sup> eigentlich Voxel - volumetric Pixel

Die Gleichungen 4.4 und 4.5 stammen von Green und Clarke (1972). VIL wird in  $\frac{kg}{m^2}$  angegeben. Auf diese Weise verwandelt man ein 3D-Radarbild in eine PPI-Anzeige mit der Menge an (flüssigem) Wasser über einer bestimmten Position. Da der Niederschlag etwa der Aufwindgeschwindigkeit proportional ist, bildet VIL sowohl eine Funktion des Aufwinds als auch der Wolkentiefe (Kitzmilller et al. 1995). Ein hoher VIL-Wert korreliert gut mit der Erscheinung von starken Gewittern und Hagel (Holleman 2001). Es besteht jedoch keine Einigkeit darüber, welcher Schwellwert für die Vorhersage von Hagel anzuwenden ist. In den USA finden oft „VIL of the day“-Schwellwerte Anwendung, die anhand der Temperaturen bei 400 und 500 hPa empirisch ermittelt wurden, oder man verwendet den VIL-Wert des ersten Hagels des betreffenden Tages.

Sehr feine Wassertropfen werden vom Radar nicht erkannt, es wird also nicht der gesamte Wassergehalt der Wolkensäule bestimmt, außerdem kann nie der gesamte Wassergehalt einer Wolke abregnen. Ein gewisser Teil bleibt immer als normale Luftfeuchtigkeit in der Atmosphäre (vgl. precipitable water). Größere Schwierigkeiten können unterschiedliche Radaruntergrenzen darstellen. In der Steiermark liegen diese Untergrenzen zwischen 2000 m und 4000 m. In diesem Bereich ist üblicherweise eine große Menge an Wasser vorhanden, sodass die Radaruntergrenze auf jeden Fall berücksichtigt werden muss.

### VIL-density

Um das Problem mit den Schwellwerten für VIL basierte Hagelwarnungen zu umgehen, versuchten Amburn und Wolf (1997) einen normalisierten VIL-Wert zu erzeugen, indem sie die Höhe der Echotops (Schwellwert: 7 dBZ) mit einbezogen.

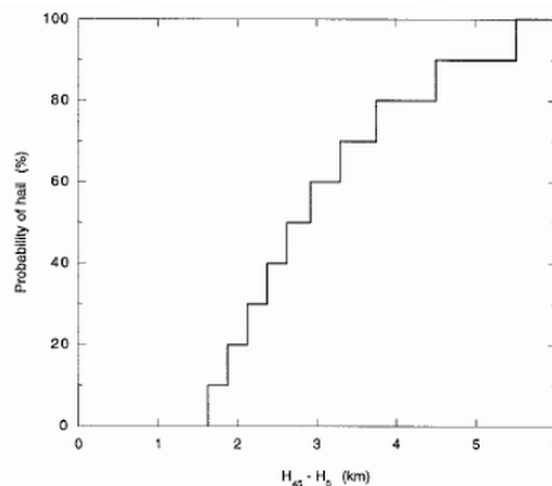
$$VIL - density = \frac{VIL}{H_{top}} \quad (4.6)$$

Die VIL-density ist dann in  $\frac{g}{m^3}$  gegeben, wenn VIL in  $\frac{kg}{m^2}$  und  $H_{top}$  in km eingesetzt wird. Amburn und Wolf schlugen vor einen Wert von  $3,5 \frac{g}{m^3}$  zu verwenden, um Hagel vorauszusagen. Unglücklicherweise ist man sich über den Vorteil dieses universellen VIL-density Wertes uneinig. Edwards und Thompson (1998) wiesen darauf hin, dass ein VIL-Wert von  $38 \frac{kg}{m^2}$  die gleichen Ergebnisse liefert wie der VIL-density Wert von  $3,5 \frac{g}{m^3}$ . Ebenso stellten sie fest, dass ein VIL-Wert von mehr als  $43 \frac{kg}{m^2}$  immer zu Hagel führt, unabhängig von der Höhe des Echotops. In den USA werden sowohl der SHI (siehe unten) als auch die VIL-Methode eingesetzt, um Hagelprognosen zu erstellen. Lenning et al. (1998) untersuchten die beiden Methoden und schlossen daraus, dass die VIL-Methode gleich gut funktioniert wie der SHI, wenn man den besten VIL-Wert im Vorhinein bestimmen kann (vgl. Holleman 2001 p.19).

## 4.7 Next Generation Weather Radar - NEXRAD

NEXRAD bildet einen US-Radarverbund von 159 operativen Radarstationen. Die Herstellerbezeichnung der Radargeräte lautet WSR-88D und steht für *Weather Surveillance Radar - 1988 Doppler*. Dieses Kapitel wurde sinngemäß von Holleman (2001) übernommen.

Der ursprüngliche NEXRAD-Algorithmus zur Erkennung von Hagel stammt von Petrocchi (1982). Er verwendet sieben Parameter, die unterschiedlich gewichtet werden. Es muss mindestens eine Zelle mit 50 dBZ in 5 bis 12 km Höhe vorhanden sein und oberhalb von 8 km Höhe müssen Echos am Radar aufscheinen. Ebenso ist ein 4 km starker Wolkenüberhang mit einbezogen. Der Algorithmus liefert vier Möglichkeiten: *Hagel*, *möglicher Hagel*, *kein Hagel*, *zu wenig Daten*. Witt et al. (1998) entwickelten ein neues Kriterium, das auf der Arbeit von Waldvogel basiert. Wie weiter oben beschrieben benötigt Waldvogel nur zwei Parameter und liefert etwas bessere Ergebnisse. Es gibt nun nicht mehr vier Möglichkeiten, sondern eine gewisse Hagelwahrscheinlichkeit je nach der Höhe des 45-dBZ-Echos und der Höhe der 0-°C-Isotherme. Die Methode von Waldvogel kombiniert das Indiz von vorhandenem kräftigen Aufwind, nämlich die Höhe des 45-dBZ-Echos mit dem Indiz für das Vorhandensein einer großen Menge von unterkühltem Wasser und/oder Eis, nämlich der starken Reflektivität einer Echozelle oberhalb der 0-°C-Grenze. Abbildung 4.3 zeigt die Hagelwahrscheinlichkeit bei NEXRAD. 1,6 km Höhendifferenz zwischen  $H_0$  und  $H_{45}$  entsprechen 10 % Hagelwahrscheinlichkeit. Bei 6 km Höhendifferenz steigt die Wahrscheinlichkeit, dass Hagel am Boden auftritt, auf 100 %.



**Abbildung 4.3:** Hagelwahrscheinlichkeit bei NEXRAD. Abb. aus Witt et al. 1998.

### **SHI - Severe Hail Index**

Als „Severe Weather“ bezeichnet man laut WMO eine meteorologische Situation, die Schaden verursachen, das gesellschaftliche Zusammenleben beeinflussen oder zum Verlust von Menschenleben führen kann, also das Auftreten von starkem Regen, Hagel, Wind, Windböen, Gewitter, Blitze, Schneestürme, Tornados usw.

Der oben beschriebene Algorithmus nach Witt et al. beinhaltet auch eine Funktion zur Bestimmung der Wahrscheinlichkeit von schwerem Hagel ( $D > 19$  mm). Hierzu wird semi-empirisch der Zusammenhang zwischen der kinetischen Energie der Hagelkörner und der Reflektivität bestimmt (Waldvogel et al. 1978a,b zit. in Witt et al. 1998). Eine Studie von Kessinger et al. (1995) kommt zu dem Ergebnis,

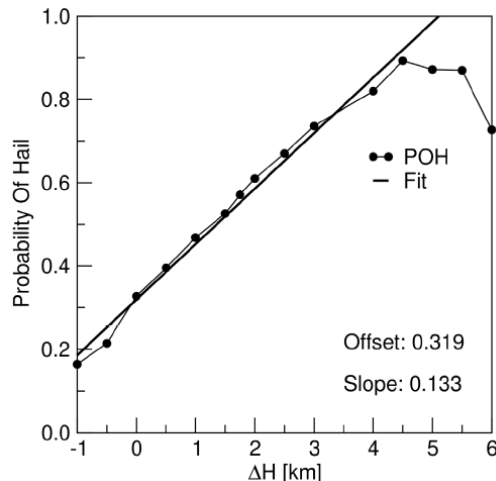
dass der SHI-Algorithmus etwas besser als der „normale“ NEXRAD-Algorithmus funktioniert, wenn es darum geht, Hagel mit einem Durchmesser von  $D > 13$  mm aufzuspüren. Weitere Ausführungen zu SHI finden sich in Witt et al. (1998).

## 4.8 Probability of Hail (POH)

Wieringa und Holleman (2006) berechnen eine Hagelwahrscheinlichkeit anhand des Waldvogelparameters  $\Delta H = H_{45} - H_0$  und folgern: „Unter Einbeziehung einer 12,5 km Toleranz, welche durch Bodenbeobachtungen festgelegt wurde, ist die POH für alle Hagelkornklassen  $\Delta H$  über einen weiten Bereich proportional.“

$$POH = 0,319 + 0,133 \Delta H \quad (4.7)$$

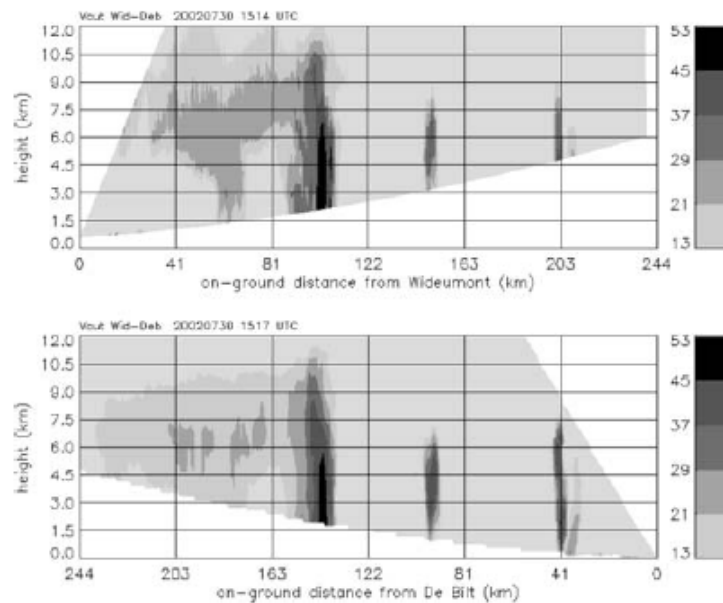
Für die Erstellung der Abbildung 4.4 wurden Bodenbeobachtungen und Schadensmeldungen mit dem Waldvogelparameter  $\Delta H$  [km] verglichen.



**Abbildung 4.4:** Hagelwahrscheinlichkeit nach Wieringa und Holleman (2006). Abb. aus Wieringa und Holleman 2006.

POH in Verbindung mit der Höhe der 0-°C-Grenze ermöglicht die Erstellung einer Karte mit verschiedenen Warnstufen, wenn die Radardaten aktuell sind (Holleman 2001).

Zusätzlich wurde mit zwei C-Band-Doppler-Radargeräten der Einfluss von Unsicherheiten bei der Bestimmung der Echotop-Höhen (Schwellwerte 7, 20 und 30 dBZ) auf POH untersucht (vgl. Delobbe und Holleman 2006). Abbildung 4.5 stellt ein und die selbe Wolke aus zwei verschiedenen Blickwinkeln dar. Es wurde bestimmt, dass der Abstand zum Radar nicht mehr als 160 km betragen sollte, da bereits kleine Abweichungen der Reflektivität die POH stark beeinflussen.



**Abbildung 4.5:** Unterschiede der gemessenen Reflektivitäten [dBZ] der Radaranlagen Wideumont (oben) und De Bilt (unten) in den Niederlanden. Der Abstand zwischen den Radars beträgt 244 km. (Abb. aus Delobbe und Holleman 2006)

## 4.9 Diskussion

Das möglichst frühzeitige Erkennen von Hagelzellen ist für den Betrieb von Hagelabwehr-Projekten von entscheidender Wichtigkeit. Sind die Zellen erst ausgebildet, ist es meist zu spät für eine wirksame Behandlung. Die Abgrenzung zu Regenzellen sollte möglichst genau erfolgen, um den Betrieb zu vereinfachen. In den Kapiteln 4.2 bis 4.7 wurden verschiedene Möglichkeiten vorgestellt, um Hagel vorauszusagen. Alle Methoden verwenden Radardaten, manche benötigen zusätzlich Radiosonden-Messwerte oder numerische Wettervorhersage-Werkzeuge, um verschiedene Temperatur-Höhen zu ermitteln. Die Methode nach Auer bestimmt die Temperatur bei der Wolkenobergrenze anhand von IR-Satellitenmessungen.

Die CAPPI-Methode ermöglicht eine grobe Einschätzung der meteorologischen Situation, versagt aber bei der Differenzierung zwischen Regen- und Hagelzellen. Das sowjetische Seeding-Kriterium wurde durch das Waldvogel-Kriterium abgelöst. Dieses ist einfacher und liefert zudem etwas bessere Ergebnisse. Die Literatur ist sich einig, dass die Methode nach Waldvogel momentan eine der besten darstellt. Weiters folgt aus der Literatur, dass die Methode nach Auer sehr vielversprechend ist. VIL kann durchaus gute Ergebnisse liefern, wenn es gelingt einen Schwellwert zu finden, der den lokalen Gegebenheiten angepasst ist. Generell müssen alle Methoden den Verhältnissen vor Ort entsprechend erweitert oder angepasst werden.

Die Berechnung der Hagelwahrscheinlichkeit POH von Wieringa und Holleman (2006) stellt eine weitere Methode dar, die auf der Arbeit von Waldvogel basiert. Die Erkenntnis, dass Echotop-Messungen nicht weiter als 160 km vom Radarstandort stattfinden sollen, betrifft die Situation in der Steiermark nicht. Das (momentan) betroffene Schutzgebiet liegt innerhalb von 110 km zum Radar am Zirbitzkogel.

## Kapitel 5

# Evaluierung von Hagelabwehrprojekten

Die Evaluierung von Hagelabwehrprogrammen ist extrem wichtig. Nur so kann die Wirksamkeit überprüft und gegebenenfalls gesteigert werden. Das Standardisieren von Verfahren, die technische Weiterentwicklung sowie die Gegenüberstellung von Kosten und Nutzen sind von Evaluierung abhängig. Das grundlegende Problem liegt darin, den künstlichen Effekt des Seeding von natürlichen Vorgängen abzugrenzen. Eine ganze Wolke physikalisch zu erfassen ist (noch) nicht möglich. Anhand eines einzigen Hagelereignisses oder eines Ereignisses ohne Hagel ist es also unmöglich eine Aussage über die vorgenommenen Maßnahmen zu treffen. Die Methoden der Statistik erlauben es Trends abzuschätzen, aufgrund der großen natürlichen Schwankungsbreite von meteorologischen Ereignissen sind allerdings mehrjährige Datenaufzeichnungen notwendig.

Bei der Evaluierung von Hagelabwehrprojekten sollten weder deren Betreiber noch die Erfinder der angewandten Abwehrmethode miteinbezogen werden, um größtmögliche Objektivität zu gewährleisten. Die Möglichkeiten zur Manipulation im gewünschten Sinne sind groß. Die Auswertemethodik darf nicht mehr verändert werden, nachdem man die Daten erhalten hat (vgl. H. H. Schiesser 1994). Die WMO (World Meteorological Organization) fordert, dass nicht Versicherungsdaten, sondern physikalische Parameter für die Evaluierung herangezogen werden. Außerdem muss eine „standardisierte“ Evaluierungsmethode überall auf der Welt reproduziert werden können (vgl. Dessens 1998). Objektivität, Wiederholbarkeit und Vorhersagbarkeit sind Forderungen für „Weather Modifikation“-Projekte. Es ist wichtig, dass unabhängige physikalische und statistische Bewertungen vorgenommen werden.

Die Kapitel 5.1 und 5.2 zeigen die grundsätzlichen Möglichkeiten, um ein „Weather Modification“-Projekt zu bewerten. Anschließend werden einige Beispiele angeführt, bevor Kapitel 5.10 auf einige Unsicherheiten bei der Erfassung von Daten hinweist.

Für die Literaturrecherche gilt das Gleiche wie unter Kapitel 4.1.

## 5.1 Physikalische Evaluierung

Als physikalische Evaluierung bezeichnet man die Interpretation von Beobachtungen anhand von etablierten Theorien und die Entwicklung von neuen Theorien aufgrund von Beobachtungen im Labor und in der Atmosphäre. Ein vollständiges numerisches Modell eines Wolkensystems mit und ohne Seeding wäre die ideale Umsetzung einer solchen Auswertung. Könnte die Meteorologie perfekte Vorhersagen treffen, so könnte man die Effekte von Seeding einfach durch den Vergleich von Testergebnissen mit Vorhersagen beurteilen. Solche Vorhersagefähigkeiten würden nicht nur ein vollständiges physikalisch-dynamisches Modell des betroffenen Wolkensystems voraussetzen, sondern auch ein Messsystem das in der Lage wäre die Anfangswerte für dieses Modell zu bestimmen. Leider existiert keines von beiden. In absehbarer Zukunft wird es nicht möglich sein ein Wolkensystem vollständig und mit hinreichender Genauigkeit zu modellieren, deshalb hat die Wissenschaft im Moment keine andere Möglichkeit als zu statistischen Methoden zu greifen, wenn es darum geht „Weather Modification“-Projekte zu beurteilen (vgl. NRC).

## 5.2 Statistische Evaluierung

Um glaubwürdige Ergebnisse von Seeding-Experimenten zu erhalten, müssen diese peinlich genau vorbereitet, durchgeführt und analysiert werden. Unsicherheiten liefern die natürliche Schwankung der Wettersysteme, unser ungenügendes Verständnis der beteiligten physikalischen Prozesse und Ungenauigkeiten im Messen der meteorologischen Parameter und im Verfolgen der ausgebrachten Wirkstoffe. Möchte man einen (eventuell nur kleinen positiven oder negativen) Effekt von Seeding nachweisen, so braucht man relativ große Datenmengen, was eine mehrjährige Aufzeichnung dieser voraussetzt (vgl. NRC). Bei der statistischen Auswertung von „Weather Modification“-Projekten werden vor allem die in den folgenden drei Unterpunkten erläuterten Verfahren angewandt (vgl. NRC).

### 5.2.1 Randomisiert

Die experimentelle Überprüfung von Ursache und Wirkung bedarf Randomisierung, besonders wenn die Testdaten einer so hohen natürlichen Varianz unterliegen, wie das bei meteorologischen Ereignissen der Fall ist. Bei der randomisierten Methode wird bei jeder auftretenden Gelegenheit zum Impfen<sup>1</sup> per Zufall entschieden, ob Maßnahmen ergriffen werden oder nicht<sup>2</sup>. Dies bedeutet, dass das Zielgebiet nicht bestmöglich geschützt wird, da nicht alle Wolken behandelt werden<sup>3</sup>, was wiederum mögliche Sponsoren abschreckt. Die statistische Auswertung eines solchen Projekts erfordert eine gewisse Anzahl von Ereignissen (z.B. 50 behandelte Zellen, 50 unbehandelte Zellen). Wird ein Projekt (aus finanziellen Gründen) frühzeitig abgebrochen, können keine statistisch fundierten Aussagen getroffen werden. Ein großer Vorteil bei der Randomisierung ist, dass die meteorologischen und topographischen Voraussetzungen bei

<sup>1</sup> d.h. wenn ein Seeding Kriterium erfüllt wird

<sup>2</sup> Randomisierung

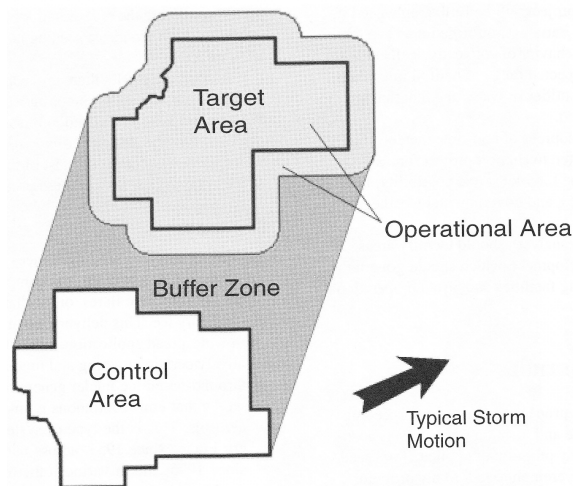
<sup>3</sup> Die Betreiber von Hagelabwehrprogrammen gehen natürlich von einer positiven Wirkung der Hagelabwehr-Maßnahmen aus

behandelten und nicht behandelten Wolken ident sind. Im wissenschaftlichen Sinn ist Randomisierung unverzichtbar, um die bestmöglichen Evaluierungsergebnisse zu erhalten (vgl. ASCE), es gibt aber noch andere Möglichkeiten die eine gute Auswertung zulassen.

Genauere Ausführungen zum Thema Statistik findet man in NRC, Appendix B.

### 5.2.2 Control Area

Die meisten Methoden zur Evaluierung von Seeding-Effekten beruhen auf dem Vergleich von Niederschlagsmengen zwischen einem zu beschützenden Zielgebiet und einem Vergleichsgebiet. Es kann sich um ein und dasselbe Gebiet handeln. In diesem Fall vergleicht man die Daten von Zeiten, zu denen Seeding stattgefunden hat, mit den Daten von Zeiten, an denen keine Behandlung stattgefunden hat. Eine andere Möglichkeit ist, zwei benachbarte Gebiete auszuwählen, von denen eines immer behandelt wird, das andere nie. In diesem Fall ist es wichtig, dass die beiden Gebiete möglichst ähnliche meteorologische Eigenschaften<sup>4</sup> aufweisen und dass das unbehandelte Gebiet keinem Einfluss von Seeding unterliegt, also gegen den Wind liegt. Huff et al. (1984) verwenden je nach Zugrichtung der Gewitter unterschiedliche Vergleichsgebiete, die jeweils dem Zielgebiet vorgelagert sind. Man kann in diesem Fall die Daten von gleichen Zeitpunkten auswerten. Eine für statistische Evaluierung noch etwas besser geeignete Methode heißt „Cross-Over“. Hier werden wieder zwei ähnliche Gebiete ausgewählt, von denen jeweils eines, durch Zufall ausgewählt, behandelt wird, während das andere dem Vergleich dient. Die „Cross-Over“ Methode beinhaltet wieder Randomisierung, d.h. es wird wieder auf Schutz verzichtet. Meist wird die Evaluierung von Hagelabwehrprojekten anhand des Vergleichs mit einem Kontrollgebiet genau dann angewandt, wenn Projekt-Sponsoren nicht auf den durchgehenden Schutz des Zielgebietes verzichten wollen.



**Abbildung 5.1:** Control Area. Schutzgebiet mit einem, gegen die Hauptwindrichtung vorgelagerten, Kontrollgebiet. Wie die Abbildung zeigt geht das Einsatzgebiet oft etwas über die Grenzen des Schutzgebietes hinaus. Abb. aus ASCE.

<sup>4</sup> z.B. in Bezug auf die Gewitterhäufigkeit, Geländeform usw.



### 5.2.3 Versicherungsdaten

Eine sehr beliebte Methode ist Versicherungsdaten zu vergleichen. Solche Daten müssen zeitlich und/oder räumlich von Seeding-Aktivitäten getrennt vorliegen. Außerdem müssen solche Daten sehr bewusst ausgewählt werden. Spricht man von Hagelschäden im allgemeinen Sinn, so muss man beachten, dass verschiedene Pflanzen in verschiedenen Entwicklungsstadien sehr unterschiedlich auf verschiedene Hagelkorngrößen reagieren (Abb. 2.4). Das kann sich beachtlich in den Schadenssummen auswirken. Eine nicht versicherte Kultur kann einen durch Hagel verursachten Totalschaden erleiden, wird aber in keiner Versicherungsstatistik aufscheinen. Ebenso wird ein Hagelereignis, das eine bereits zerstörte Fläche heimsucht, nicht mehr in den Listen geführt werden. Zum Vergleich kann man auch den Ernteertrag heranziehen, wobei zu berücksichtigen ist, welche Kultur angebaut wurde und dass insgesamt der Ertrag in den letzten Jahrzehnten kontinuierlich gesteigert wurde. Grund dafür ist besseres Verständnis für Saatzeiten, Bewässerung, Düngemittel u.s.w.

Werden nicht Ernteauffälle, sondern Sachschäden für eine Evaluierung von Hagelabwehrprojekten herangezogen, so muss ebenfalls darauf geachtet werden, dass die Daten vergleichbar sind. Beispielsweise können verschiedene Versicherungen die Schadensfälle unterschiedlich aufnehmen, es können Blitz-, Sturm- und Hagelschäden in eine gemeinsame Kategorie fallen und nicht versichertes Eigentum wird wieder in keiner Bilanz aufscheinen. Durch zunehmenden Wohlstand kam es im Laufe der Jahre zu immer mehr persönlichem Besitz. Dieser wird zunehmend versichert, wodurch es vermehrt zu Schadensmeldungen kommt. Dies muss aber nicht bedeuten, dass auch mehr Hagelereignisse aufgetreten sind. Einen Lösungsansatz für dieses Problem liefert Svabik (2001), indem er eingezahlte und ausbezahlte Prämien der Versicherungen gegenüberstellt.

Gemeinde-nummer	Gemeinde (Tarifierungsgemeinde des Kunden)	Bezirk	Anzahl Schadensmeldungen (Betriebe)	Gemeldetes Schadensdatum	Schadensart
60722	Pöllau	Hartberg	1	2010 04 14	Hagel
60620	Hitzendorf	Graz-Umgebung	1	2010 06 13	Hagel
60735	Schachen bei Vornau	Hartberg	33	2010 06 13	Hagel
60738	Schöneegg bei Pöllau	Hartberg	1	2010 06 13	Hagel
60746	Vornholz	Hartberg	26	2010 06 13	Hagel
60749	Wenigzell	Hartberg	18	2010 06 13	Hagel
61732	Naintsch	Weiz	3	2010 06 13	Hagel
60422	Jagerberg	Feldbach	1	2010 09 13	Hagel

**Tabelle 5.1:** Auszug der Schadensmeldungen 2010. Quelle: Österreichische Hagelversicherung.

### 5.3 Evaluierung nach Hsu und Changnon

In „On the Evaluation of Operational Cloud Seeding Projects“ sprechen Hsu und Changnon (1983) verschiedene Techniken und statistische Methoden zum Evaluieren von nicht-randomisierten „Weather Modification“ Projekten an. Es folgt eine Zusammenfassung dieser Abhandlung:

Evaluierungen von Wetter-beeinflussenden Projekten basieren meist auf räumlichen und/oder zeitlichen Vergleichen. Gültige Ergebnisse erhält man nur, wenn man jede Art der statistischen Beeinflussung während der Erstellung und Ausführung von Projekten ausschließt. Während einer vierjährigen Studie wurden 5 Datensätze aus vier Regionen verschiedenen Möglichkeiten der Evaluierung unterzogen, folgende Daten wurden mit eingebunden: Monatliche- und Jahres-Regenmengen (Mai-September), Schadensmeldungen der Hagelversicherung, 48-Stunden- und Gewitter-Gesamtregenmenge. Die Simulation bestand aus einer Überlagerung von angenommenen Seeding-Effekten über natürliche Niederschlagsverteilungen.

Seeding Simulation Areas	Most Powerful Statistical Techniques
Kansas Rain (monthly and seasonal)	PCR(1)
Eastern Illinois Rain (monthly and seasonal)	PCR(1) and DR
Montana Hail (seasonal)	PCR(3)
Southern Illinois Storms Constant Increases Varying Increases	PCR(1) and MR PCR(1), MR and SRP
Southern Illinois 48-Hour Rains	MR and PCR(1)

**Tabelle 5.2:** Simulationsergebnisse nach Hsu und Changnon (1983)

- PCR Principal component regression
- PCR(1) Retaining the first component
- PCR(3) With three components
- MR Multiple regression
- DR Double ratio
- SRP Sum of rank power test

Die Hauptkomponenten-Regressionsanalyse PCR(1) lieferte die besten Ergebnisse bei konvektivem Regen, PCR(3) stellte sich als die beste Technik bei Hagel heraus. Die Evaluierungen der unterschiedlichen Projekte lieferten verschiedene Ergebnisse. Zwei der Projekte zeigten eine Erhöhung der Regenmenge sowohl bei Regennessern als auch bei Radarechos (1976: 39 %, nicht-signifikant, target-control; 1979: 39 %, signifikant im 10 % Bereich, target-control inkl. historischer Vergleichsdaten). Ein Projekt zeigte eine Reduktion der Regenmenge um 29 % (nicht-signifikant). Die Auswertung des Hagelabwehr-Projekts lieferte eine Reduzierung der Hagelschäden während der Seeding-Periode 1975-1979 im Vergleich zum Zeitraum 1948-1971.

Grundsätzlich empfehlen Hsu und Changnon folgende Punkte zu berücksichtigen:

- Einbinden von zusätzlichen Variablen; durch die Kombination von atmosphärischen Daten wie Luftdruck, Bewölkung oder Wind mit Regen- oder Hagelraten von Bodenstationen erhofft man Veränderungen durch Seeding besser aufspüren zu können.
- Aussagekraft von historischen Vergleichsdaten; auf jeden Fall sollten Daten, die vor einem „Weather Modification“-Projekt aufgezeichnet wurden, in eine Evaluierung eingebunden werden. Diese Daten müssen auf die natürliche Schwankung untersucht werden, bevor sie mit den Daten der behandelten Wolken verglichen werden.
- Projektdaten; die Verfügbarkeit und Qualität aller mit dem Projekt in Verbindung stehender Aufzeichnungen ist von entscheidender Bedeutung. Vor Projektstart beinhaltet das die spezifischen Projektziele, die anzuwendende Impfhypothese, Seeding-Kriterium sowie genauen Beginn und Ende der Seeding-Perioden. Während eines laufenden Projekts müssen Entscheidungen über Änderungen und Daten wie Flugrouten, Radarbilder, Seeding Zeiten u.s.w. aufgezeichnet werden. Während eines „Weather Modification“-Projekts muss man sich mit (mindestens) vier Punkten beschäftigen: *Projektgestaltung, Auswahl eines Seeding-Kriteriums, Durchführen von Seeding-Aktivitäten, Sammeln und Aufzeichnen von Daten.*
- Randomisierung; für eine statistisch zuverlässige Auswertung ist Randomisierung wünschenswert. Während eines Projektes können verschiedene Wirkstoffe und Seeding-Mengen verglichen werden.

### 5.4 Auswertung von HTP nach Svabik

Dr. Otto Svabik (2001) von der ZAMG Wien beurteilt das steirische Hagelabwehrprogramm anhand von Hageltestplatten<sup>5</sup> (HTP), welche im Raum Gleisdorf-Weiz aufgestellt wurden. Bewertet werden: *Hagelhäufigkeit, Hagelausdehnung, Hagelkorngrößen, Hagelintensität*. Die Anzahl der jährlich getroffenen HTP ist rückläufig, obwohl die Anzahl der Gewitterereignisse pro Jahr etwa gleich bleibt. Das erklärt sich dadurch, dass die durchschnittlich pro Ereignis verhagelte Fläche während des Untersuchungszeitraums kontinuierlich abnimmt und im Zeitraum 1996-2001 nur mehr die Hälfte gegenüber dem Zeitraum 1982-1986 beträgt. Die Anzahl der Hagelkörner bis 15 mm Durchmesser nimmt zu, während die Anzahl der Körner mit D=15-25 mm im untersuchten Zeitraum abnimmt. Hagelkörner mit einem Durchmesser von mehr als 30 mm sind in Österreich generell sehr selten. Die Intensität eines mittleren Hagelschlages ist im Laufe der Jahre leicht zunehmend, obwohl der Trend zu kleineren Hagelkörnern hin geht.

Es stehen zwar nur HTP-Auswertungen aus Jahren, in denen Seeding stattfand, zur Verfügung, die positive Entwicklung kann aber möglicherweise auf eine Steigerung der Effizienz zurückgeführt werden (Tabelle 5.3). Svabik empfiehlt eine Unterscheidung der HTP-Daten hinsichtlich Hagelschlag mit und ohne Hagelabwehrmaßnahmen, um den tatsächlichen Wirkungsgrad der Hagelabwehraktivitäten festzustellen.

---

<sup>5</sup> siehe Kapitel 3.3

Zeitraum	Technik
1982-1986	Bodengeneratoren
1987-1991+	Flugzeugeinsätze
1992-2001+	Nutzung von Radarbildern
1996-2001+	kurzfristige Wetterprognosen

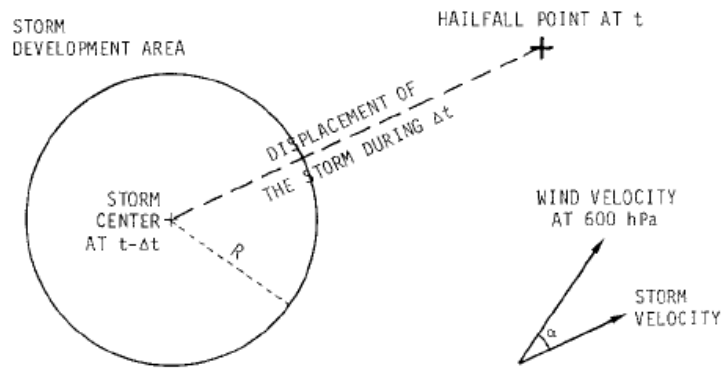
**Tabelle 5.3:** 5-Jahresschritte (Svabik 2001).

## 5.5 Bodengeneratoren in Südwest-Frankreich (Dessens)

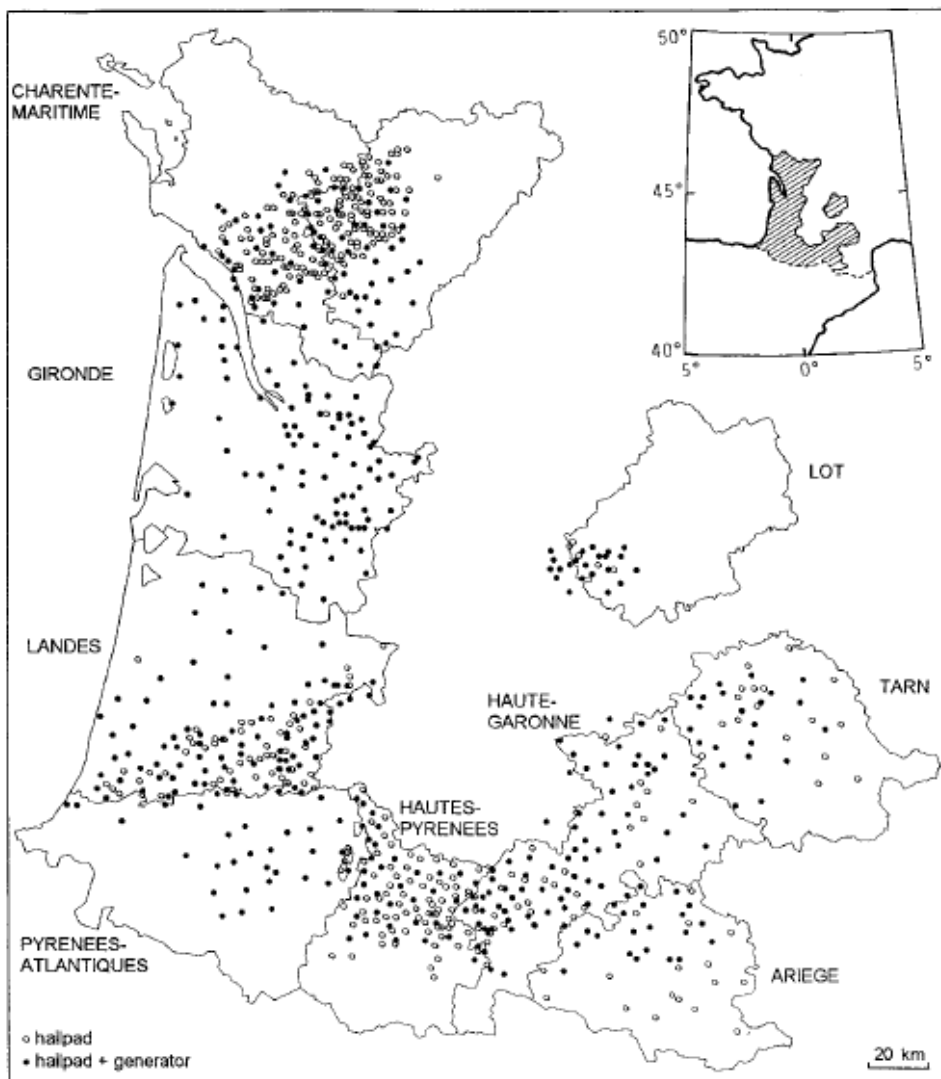
Jean Dessens (1998) beschreibt die Evaluierung eines groß angelegten Hagelabwehr-Projekts in Südwest-Frankreich (Abb. 5.3). Das zu schützende Gebiet wurde durch ein Netzwerk von Bodengeneratoren behandelt. Da Hageltestplatten nur innerhalb des Zielgebiets zur Verfügung standen, war es nicht möglich die Hagelereignisse zwischen geschützten und ungeschützten Gebieten zu vergleichen. Man verglich stattdessen Hagelereignisse in Gebieten die überdurchschnittlich geimpft wurden mit solchen in Gebieten die unterdurchschnittlich mit AgJ behandelt wurden. Als charakterisierenden Parameter eines Hagelereignisses verwendet Dessens die Anzahl der Hagelkörner mit einem Durchmesser von mindestens 0,7 cm. So wird für jeden Hageltag die mittlere Anzahl von Körnern  $> 0,7$  cm bestimmt und für jedes einzelne Hagelereignis wird bestimmt, ob überdurchschnittlich viele Hagelkörner zu Boden gefallen sind. In ähnlicher Weise verfolgt Dessens jede Hagelzelle bis zu ihrer Entstehung zurück und bestimmt die Menge des eingebrachten AgJ, wobei der berücksichtigte Radius um die Zelle für alle Hagelereignisse gleich gehalten wird. Die Korrelation dieser Werte kann nun für einen Tag, für alle Tage oder für eine gewisse Gruppe von Tagen bestimmt werden. Die Einteilung in Gruppen geschieht dabei nach meteorologischen Verhältnissen wie z.B. der Windrichtung.

Zwischen 1988 und 1995 wurden an 53 Hageltagen, an denen Seeding stattfand, 630 Hagenereignisse aufgezeichnet. Die Methode nach Dessens deutet darauf hin, dass die Menge des ausgebrachten AgJ mit der Anzahl der Hagelkörner zusammenhängt. Die Menge des AgJ wird dabei 80 Minuten<sup>6</sup>, bevor Hagel am Boden auftritt, in einem Radius von 13 km um das Zentrum der Zelle bestimmt. Die Anzahl der Hagelkörner nimmt linear mit der Menge an ausgebrachtem AgJ ab. In den stärker geimpften Zellen wurde eine Reduktion von 42 % festgestellt. Dieser Wert korreliert gut mit einer früheren Studie von Versicherungsdaten, die eine Abnahme der Schäden von 41 % im Operationsgebiet zeigte.

<sup>6</sup> 20 Minuten bis das AgJ in die Wolke gelangt plus 60 Minuten für die Entwicklung der Zelle bis Hagel auftritt (Foote 1984, Dessens 1998).



**Abbildung 5.2:** Schema der Methode nach Dessens. Die ausgebrachte Menge an AgJ innerhalb des Kreises wird mit der Anzahl der Hagelkörner an der Stelle (+) verglichen. (Abb. aus Dessens 1998).



**Abbildung 5.3:** Netz der Bodengeneratoren und HTP in Südwest-Frankreich, Stand 1995. (Abb. aus Dessens 1998).

## 5.6 Evaluierung nach Woodley und Rosenfeld (Texas)

Woodley und Rosenfeld (2003) entwickelten eine Methode zur Evaluierung von short-term, nonrandomized operational Cloud-Seeding-Projekten. Untersucht wurden dabei zwei Programme zur Erhöhung der Niederschlagsmenge in Texas. Dadurch dass Hagelabwehrprojekte und solche zur Erhöhung der Niederschlagsmenge sehr eng miteinander verwandt sind, geht man davon aus, dass eine Zunahme der Regenmenge gleichzeitig eine Abnahme von Hagel bedeutet. Bewertet wurden die beiden Programme anhand der folgenden Kriterien:

Erreicht ein Radarecho den Wert von 40 dBZ, so wird ein Feld mit einem Radius von 25 km rund um dieses Echo definiert. Für dieses Feld (FTAU - Floating Target Analysis Unit) wird rückwärts und vorwärts in der Zeit eine Zugbahn erstellt und es werden die maximale Reflektivität und die Regenrate dokumentiert. Ein neues FTAU wird definiert, wenn ein weiteres Radarecho 40 dBZ erreicht und wenn dieses mindestens 25 km weit von dem Zentrum eines bestehenden FTAUs liegt. Die FTAUs dürfen sich überschneiden, um sicherzustellen, dass alle Radarechos in der Analyse berücksichtigt werden. Auf diese Weise werden für das gesamte Untersuchungsgebiet FTAUs definiert. Die erstellten Felder werden anschließend mit den aufgezeichneten Seeding Informationen überlagert und die FTAUs werden in „seeded“ (S) und „non seeded“ (C - Control) unterteilt. Control-Einheiten dürfen niemals in irgendeiner Weise AgJ empfangen haben und müssen zu jeder Zeit einen Mindestabstand von 25 km zu Seeded FTAUs gehalten haben. (C) FTAUs sollen nach Möglichkeit aus der selben Gegend und vom selben Tag stammen, wenn sie mit (S) FTAUs verglichen werden, und sie müssen bezüglich Reflektivität und Regenrate zur Zeit des ersten Seeding zusammenpassen. Woodley und Rosenfeld werteten die Regenmengen der zwei verschiedenen Gruppen aus und stellten eine Zunahme des Niederschlags von über 50 % in den behandelten Zellen fest.

## 5.7 Die Abflussmenge von Gewässern (Silverman)

Bernard Silverman (2010) vergleicht 11 operationelle Cloud-Seeding-Programme in den Bergen der Sierra Nevada (USA: Kalifornien, Nevada) hinsichtlich ihrer Wirksamkeit die Erhöhung des Niederschlags betreffend. Die untersuchten Programme sind nicht randomisiert, werden aber über einen genügend langen Zeitraum betrieben, um statistisch aussagekräftig beurteilt werden zu können. Silverman beobachtet die Abflussmenge von Gewässern und schließt so auf die Regenmengen in den unterschiedlichen Einzugsgebieten.

Tabelle 5.4 zeigt die 11 untersuchten Projekte im Überblick. Drei der 5 Programme, bei denen keine signifikante Steigerung der Niederschlagsmenge festgestellt werden konnte, liegen in dem Gebiet das Silverman mit „Sierra East“ bezeichnet. Diese Gegenden befinden sich auf der windabgewandten Seite der Berge der Sierra Nevada, die 6 als positiv bewerteten Programme hingegen liegen auf der Aufwind-Seite der Berge.

Programm	Seed mode	Beginn	Niederschlagssteigerung (90 % Konfidenz-Intervall)
Sierra Southwest			
Kern	F	1977	2,4-15,2 %
Kaweah	F	1976	kein Ergebnis
Kings	B+F	1955	0,0-9,2 %
San Joaquin	B+F	1951	1,5-9,4 %
Sierra Northwest			
Tuolumne	F	1991	2,4-7,5 %
Upper Mokelumne	B	1954	kein Ergebnis
Upper American	B	1969	1,8-24,4 %
Lake Almanor	B	1954	2,3-12,6 %
Sierra East			
Eastern Sierra	B	1987	kein Ergebnis
Carson-Walker	B+F	1980	kein Ergebnis
Tahoe-Truckee	B+F	1978	kein Ergebnis

**Tabelle 5.4:** Die 11 untersuchten Cloud-Seeding-Projekte (Silverman 2010). Seed mode: B-Bodengeneratoren, F-Flugzeuge.

## 5.8 Das griechische Hagelabwehrprojekt

Die griechische Hagelabwehr begann 1981 mit einem zweijährigen operativen Projekt. Nach ersten Erkenntnissen beschloss man ein neues Design, sowohl zur operativen Hagelabwehr als auch zu Forschungszwecken, zu entwerfen. 1984 startete ein 5-jähriges Programm, wobei die ersten drei Jahre der Forschung galten, die beiden letzten Jahre sollten die gewonnenen Ergebnisse bestätigen. Das Zielgebiet wurde in drei Bereiche unterteilt: A1, A2 und A3. A1 wurde wiederum in zwei Bereiche unterteilt, um eine randomisierte cross-over-Behandlung<sup>7</sup> zu ermöglichen. A2 und A3 wurden rein zu Schutzzwecken behandelt. Das Projekt wurde nach der Hypothese des „Beneficial Competition“ geplant. Die Behandlung der Wolken erfolgte mittels Flugzeugen entweder an der Wolkenbasis oder oberhalb der Wolken spitze – je nach Art des Gewitters (Details in Karacostas). Im gesamten Gebiet wurden Hageltestplatten aufgestellt, um zusätzliche Informationen über die Hagelereignisse zu erhalten.

„Um den Effekt der Hagelabwehr zu zeigen ist es notwendig, randomisierte Projekte zu betreiben. Nur so kann, innerhalb akzeptabler Grenzen, die Theorie eines Modells bestätigt werden“. Darauf basierte das griechische Hagelabwehrprojekt.

Als Versuchseinheiten kamen Hageltage zum Einsatz. Einzelne konvektive Zellen bzw. Zellenkomplexe konnten aufgrund von Kontaminationsproblemen und mangelnder (digitalisierter) Radar-Daten nicht definiert werden. Es wurden alle Hageltage für die statistische Auswertung in Betracht gezogen, die eine Zelle über dem Gebiet A1 aufwiesen und eine Reflektivität von mindestens 35 dBZ in den Luftschichten zwischen -5 °C und -30 °C vorweisen konnten. Zwei Versuchseinheiten mussten durch 6 bis 7 Stunden Tageslicht voneinander getrennt sein, um Kontaminationsprobleme zu verhindern. Für jede dieser Versuchseinheiten wurde das Gebiet A1 – zufällig – in Target- bzw. Control-Area unterteilt. Diese

<sup>7</sup> vgl. Kapitel 5.2

cross-over-Methode eliminiert weitgehend die Probleme der Vergleichbarkeit von Target- bzw. Control-Area und es wird eine kürzere Evaluierungs-Periode ermöglicht. Der (relativ niedrige) Schwellwert von 35 dBZ ergibt sich einerseits daraus, dass man die Gewitterzellen in einem sehr frühen Entwicklungsstadium aufspüren wollte, und andererseits aus der Forderung keinen Hageltag zu vermissen.

Vor der Auswertung wurden alle Versuchseinheiten noch einmal auf Verlässlichkeit und Gültigkeit überprüft, besonders um Kontamination ausschließen zu können. Es wurden 37 Datensätze bestätigt, welche alle den Anforderungen einer statistischen Auswertung genügen. In Tabelle 5.5 werden die 21 untersuchten Parameter und die Ergebnisse für zwei Verfahren präsentiert. Die statistische Auswertung liefert für 18 der 21 Parameter (86 %) einen positiven Effekt im Bereich von 35-72 %. (Karacostas)

No.	Parameters	RDR	RQR	p-value
1	Number of Pads Hit	0,32	0,32	0,093
2	Stone Counts (Total)	0,45	0,45	0,019
3	Stone Counts (Average)	0,54	0,53	0,010
4	Point Severity Index (T)	0,68	0,68	0,007
5	Point Severity Index (A)	0,72	0,72	0,006
6	Stone Kinetic Energy (T)	0,70	0,70	0,007
7	Stone Kinetic Energy (A)	0,51	0,50	0,014
8	Mean Dent Diameter	0,36	0,36	0,057
9	Median Dent Diameter	0,35	0,35	0,061
10	% Dent Area (T)	0,63	0,63	0,010
11	% Dent Area (A)	0,41	0,40	0,030
12	Mean Dent Area (T)	0,42	0,43	0,033
13	Mean Dent Area (A)	0,22	0,20	0,106
14	Median Dent Area (T)	0,38	0,38	0,041
15	Median Dent Area (A)	0,16	0,13	0,127
16	Mean Stone Diameter	0,35	0,35	0,042
17	Median Stone Diameter	0,35	0,35	0,047
18	% Stone Area (T)	0,58	0,58	0,009
19	% Stone Area (A)	0,48	0,47	0,021
20	Mean Stone Area	0,39	0,39	0,051
21	Median Stone Area	0,37	0,37	0,050

**Tabelle 5.5:** Treatment effects and corresponding probabilities (p-values), calculated through the Ratio Statistics theory. (Karacostas)

RDR Root Double Ratio  
 RQR Root Quadruple Ratio



## 5.9 Numerische Modelle

Numerische Modelle können eine Schlüsselrolle bei der Entwicklung von „Weather Modification“ Projekten spielen. Die Vorhersage und Simulation von Großwetterlagen funktioniert bereits sehr gut, im Detail können aber noch keine präzisen Prognosen erstellt werden. Die Leistungsfähigkeit von Rechnern ist möglicherweise schon (bald) groß genug, um realistische, hochauflösende und vorhersagende Simulationen zu erstellen. Die mikrophysikalischen Prozesse in der Atmosphäre müssen jedoch noch besser verstanden und in die Modelle eingebunden werden. Weiters muss eine Möglichkeit gefunden werden, die „Anfangswerte“ exakt zu bestimmen, um die Modelle starten zu können. Eindimensional ist dies mit Radiosonden an Wetterballons bereits möglich. Numerische Simulationen mit realistischen Ergebnissen können behilflich sein die Abläufe des „Cloud Seeding“ zu verbessern, physikalische Hypothesen können bestätigt oder verfeinert werden. Zwei identische Wolken können nur am Computer erstellt werden, in der Natur werden sie niemals auftreten. Die Abläufe innerhalb einer Wolke ohne Behandlung und die Auswirkungen von Seeding innerhalb der (identischen) Wolke können also nur am Rechner gegenübergestellt werden. Trotz allem sind die vorhandenen Modelle noch nicht in der Lage verlässliche Vorhersagen zu treffen. Es gibt noch zu viele Unbekannte und die Wolkensysteme können noch nicht fein genug aufgelöst werden.

## 5.10 Diskrepanzen bei der Evaluierung

Je nach Ansatz kommen bei der Evaluierung von Hagelabwehrprojekten physikalische Messungen und verschiedene Statistiken zur Anwendung. Menschliche und technische Unzulänglichkeiten können an vielen Stellen auftreten. Generell ist das Verständnis der Hagelzellen noch zu gering. Echtzeitmessungen und Modellsimulationen müssen genaueren Aufschluss über die Vorgänge in den Wolken geben, bevor man die Effekte des Seeding beurteilen kann. Es muss geklärt werden, welche Wolken sich für eine Behandlung eignen, und zu welchem Zeitpunkt und in welchem Bereich dieser Wolken AgJ eingebracht werden kann, um den gewünschten Erfolg – je nach Hypothese – zu erreichen. Die Grundlagenforschung im Bereich der Wolkenphysik muss noch fortgeführt werden. Das nötige Verständnis, um wissenschaftlich aussagekräftige Evaluierungen liefern zu können, kann laut NRC (2003) durchaus noch Jahrzehnte der Forschung benötigen. Einige potentielle Unsicherheiten werden in den folgenden Punkten angesprochen (vgl. NRC, ASCE).

### 5.10.1 Messunsicherheiten

Obwohl sich die klassischen Methoden zum Evaluieren von Seeding-Effekten etabliert haben, treten in der Praxis doch beträchtliche Schwierigkeiten auf. Möchte man z.B. die gesamte Regenmenge eines Zielgebietes mit derjenigen eines Kontrollgebietes vergleichen, so muss diese Regenmenge natürlich auch möglichst genau bestimmt werden. Regenmesser können an ihrem Standort die Regensumme sehr exakt bestimmen. Bei konvektiven Wettersituationen ist die Regenmenge jedoch zeitlich und räumlich sehr unterschiedlich, was es erschwert, exakte Aussagen für ein ganzes Gebiet zu treffen. Gefrorener Nieder-

schlag wird von den Regenmessern oft falsch interpretiert. Flächendeckende physikalische Messungen von Niederschlagsform, -menge, -temperatur usw. sind wünschenswert. Wetterradars können räumlich und zeitlich recht gute Auflösungen erzielen, doch tritt hier ein anderes Problem an den Tag. Neben einigen Vereinfachungen ist besonders die Umrechnung der Radar-Reflektivität in eine Regenrate am Boden bei konvektiven Wettersituationen problembehaftet. Andere direkte und indirekte Messungen, wie z.B. die Energie des Hageleinschlags<sup>8</sup> oder die Abschätzung von Ernteausfällen<sup>9</sup>, bringen wieder Unsicherheiten, welche berücksichtigt werden müssen.

### 5.10.2 Unsicherheiten bei der Zellendefinition und Zellenverfolgung

Viele Methoden zur Evaluierung von „Weather Modification“-Projekten basieren auf der Verfolgung von einzelnen Gewitterzellen über die Zeit. Dabei werden verschiedene Parameter dokumentiert und Veränderungen ausgewertet. Solche Zellen zu definieren und zeitlich zu verfolgen stellt eine große Herausforderung dar. Eine konvektive Zelle kann nicht als einzelne Einheit betrachtet werden. Es gibt Multizellen- und Superzellengewitter, Zellen lösen sich auf, entstehen neu, vereinigen und trennen sich ständig mit benachbarten Zellen. Die Vermischung der Luftschichten macht es schwierig einzelnen Zellen zu folgen, gleichzeitig kann sie aber auch durchaus nützlich sein, wenn es darum geht das AgJ zu verteilen. In vielen Projekten ist die Konzentration des AgJ gleich nach dem Ausbringen zu hoch, um effektiv wirksam zu sein. Durch die Verdünnung wird das Mittel erst effektiv, bevor eine weitere Vermischung der Luftmassen die Konzentration so stark herabsetzt, dass keine Wirkung mehr auftritt (NRC).

Zwei Wolken sind nie identisch, und Wolken sind nicht unabhängig voneinander, es besteht eine gewisse Wechselwirkung. Vermutlich nimmt die Abhängigkeit zweier Wolken mit Zeit und Raum voneinander ab, doch sind die gegenseitigen Beeinflussungen zweier räumlich getrennter Wolken am gleichen Tag oder zweier Wolken im gleichen Gebiet und gleicher Luftschicht an unterschiedlichen Tagen nicht messbar. Diese Tatsache wird in vielen Studien einfach ignoriert. Es gibt bereits eine Anzahl von Methoden und Softwareprodukten zur Zugbahnbestimmung. Als Beispiel sei die Software „Thunderstorm Identification Tracking Analysis and Nowcasting - TITAN“ genannt.

### 5.10.3 Unsicherheiten ob der Wirkstoff das Ziel erreicht

Wenn eiskeimbildende Mittel, wie z.B. AgJ, direkt in den oberen Bereich einer konvektiven Zelle eingebracht werden, besteht kaum Zweifel daran, dass ein Teil des Mittels in Regionen der Wolke gelangt, die reich an unterkühltem Wasser sind. Wird das Mittel in der Wolkenbasis in einer Aufwind-Region ausgesetzt, so wird es von diesem Aufwind mitgetragen und gelangt in Höhen, wo es wirksam werden kann. Bei großräumig angelegten „Weather Modification“-Projekten werden die ausgewählten Wolken üblicherweise bereits in windaufwärts gelegenen Gebieten behandelt. Die Seeding-Wirkstoffe werden dann mitgetragen und sollen so wirken, dass über dem Zielgebiet der gewünschte Effekt erreicht wird. Ob und in welcher Menge das Ziel erreicht wird, hängt von den verschiedenen Luftströmungen zwischen

<sup>8</sup> Stammen alle Abdrücke auf der Hageltestplatte von einem einzigen Hagelereignis?

<sup>9</sup> Sind die Angaben der Versicherungsnehmer korrekt?

dem Ort, wo das Mittel freigesetzt wurde, und dem Zielgebiet ab. Für die Evaluierung von Hagelabwehr-Projekten ist es notwendig die Verteilung des ausgebrachten AgJ zu kennen, da die verschiedenen Zellen bzw. Gebiete in *behandelt* und *nicht behandelt* unterteilt werden müssen. Idealerweise sollten auch Seeding-Zeitpunkt und -Menge in den verschiedenen Bereichen der Atmosphäre bekannt sein. Für besseres Verständnis können in diesem Fall Indikatoren sorgen. Diese werden dem AgJ beigemischt und sind entweder über das Radar zu verfolgen oder werden in Bodenproben nachgewiesen.

### 5.11 Zusammenfassung der Methoden

Grundsätzlich können bei Hagelabwehr-Projekten physikalische Messungen, z.B. Niederschlagsmengen, oder indirekte Auswirkungen, z.B. Ernteerträge, beurteilt werden. Die Methode nach Svabik scheint den Kern der Sache zu treffen: Anhand von Testplatten werden Größe und Anzahl der Hagelkörner festgehalten. Weitere Daten sind nicht notwendig. Dessen kommt ohne Vergleichsgebiet aus, indem er die Zellen in mehr oder weniger stark behandelt unterteilt und ebenfalls Testplatten auswertet. Die Methode nach Woodley und Rosenfeld (2003) entspricht im Grunde einer Evaluierung mit einem (beweglichen) Vergleichsgebiet, wobei behandelte Zellen und solche, die nicht behandelt wurden, gegenübergestellt werden. Silverman bringt eine neue Idee ins Spiel, indem er die Abflussmengen von Gewässern überprüft. Diese Abflussmengen geben Aufschluss über die Niederschlagsmengen in den jeweiligen Einzugsgebieten. In Griechenland wurde eines der wenigen randomisierten Projekte durchgeführt.

## Kapitel 6

# Evaluierung der Hagelabwehr in der Steiermark

Die Evaluierung von Hagelabwehr-Projekten ist notwendig, um zu kontrollieren, ob mit den getroffenen Maßnahmen die gesteckten Ziele auch erreicht wurden. Die Auswertung der Effizienz von Hagelabwehrmaßnahmen stellt oft eine Herausforderung dar, da aus wissenschaftlicher Sicht nur die randomisierten Programme statistisch eindeutige Aussagen zulassen. Diese Programme sind jedoch sehr selten, da sie große finanzielle Mittel erfordern, das Gebiet über dem sie stattfinden jedoch nicht nach den bestmöglichen Gegebenheiten geschützt wird. Auch in der Steiermark werden die Wolken nicht zufällig behandelt, sondern es wird versucht den betreuten Gemeinden größtmöglichen Schutz vor Hagel zu bieten.

Es ist unmöglich die Effekte des Impfens anhand einer einzigen Gewitterzelle zu bestimmen. Die Analyse von Hagelabwehr-Projekten kann jedoch Tendenzen aufzeigen, ob insgesamt weniger Schaden aufgetreten ist. Dies geschieht anhand von statistischen Auswertungen. Physikalische Messungen des Wolkenverhaltens sind sehr wünschenswert. In manchen Hagelabwehr-Projekten wurden Hagelflugzeuge mit mikrophysikalischen Instrumenten bestückt, um Messungen vor und nach dem Impfen vorzunehmen, und obwohl nicht jede einzelne Wolke bezüglich der mikrophysikalischen Verhältnisse vermessen werden kann, erhält man doch einen Eindruck der Auswirkungen des Impfens (ASCE). In der Steiermark fanden solche Messungen nicht statt, es stehen aber Wetterradardaten und andere physikalische Messwerte zur Verfügung.

Um potentiell gefährliche Gewitterwolken in irgend einer Form klassifizieren zu können, werden verschiedene Parameter herangezogen. Die in der Steiermark zur Verfügung stehenden Daten und Messwerte wurden in Kapitel 3 vorgestellt. Die vorliegende Arbeit dient als Vorbereitung für die Erstellung eines computergestützten Hagelabwehr-Analyse-Produkts. Dieses Werkzeug soll in Zukunft<sup>1</sup> große Datenmengen untersuchen. Wenn möglich soll damit die Wirksamkeit der Hagelabwehr-Maßnahmen in Zahlen ausgedrückt und eine Steigerung der Effizienz erreicht werden.

---

<sup>1</sup> Bei meteorologischen Vorgängen ist die natürliche Schwankung der Messwerte so groß, dass es sehr wichtig ist, viele Daten in die Untersuchungen einzubinden. Die Flugrouten der Hagelflieger werden seit 2009 aufgezeichnet. Für eine statistische Auswertung sind mindestens fünf Jahres-Datensätze notwendig.

In der Steiermark sind besonders die Wetterradar-Daten der letzten Jahre in guter Qualität verfügbar. Gute Qualität bedeutet flächendeckend und mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung. Ein Großteil der bekannten Evaluierungsansätze verwendet aus diesem Grund Radardaten. Die große natürliche Schwankungsbreite bei meteorologischen Systemen verlangt, dass viele Gewitter in die Analyse mit einbezogen werden. Datensätze aus mehreren Jahren können nur auf automatisiertem Weg bearbeitet werden, was die Entwicklung eines computergestützten Auswerte-Werkzeugs nahe legt.

An der TU Graz wird im Moment eine Datenbank aufgebaut, die in Zukunft als Grundlage für Berechnungen dienen soll, und es wird das Analyse-Programm *Hagel.exe* weiterentwickelt, um als Basis für weitere Arbeiten zur Verfügung zu stehen.

Dieses Kapitel soll einige Lösungsansätze aufzeigen, um Herausforderungen im Themenbereich Hagelabwehr zu begegnen. Es werden einige Beispiele gezeigt, die hilfreich sein können, um ein Seeding-Kriterium und in weiterer Folge einen Evaluierungs-Algorithmus zu entwickeln. Diese Arbeit schlägt folgende Entwicklungsstufen vor:

1. Seeding-Kriterium: Dadurch werden die potentiellen Hagelzellen von „gewöhnlichen“ Wolken getrennt.
2. Automatisierte Zellenverfolgung: Die anhand des Seeding-Kriteriums definierten Zellen müssen mit der Zeit verfolgt werden. Dabei werden verschiedene Parameter dokumentiert.
3. Die Zugpfade der Hagelzellen mit Seeding-Informationen überlagern: Unterteilen der Zellen in *behandelt, wenig behandelt, nicht behandelt*.
4. Evaluierung

### 6.1 Ein steirisches Seeding-Kriterium

Ein Seeding-Kriterium ist dann erfüllt, wenn unter bestimmten meteorologischen Bedingungen eine gewisse Hagelwahrscheinlichkeit gegeben ist und durch den Einsatz von bestimmten Maßnahmen die Möglichkeit besteht den Hagelschlag zu vermindern. Ein etwaiges Seeding-Kriterium, das Hagelzellen zwar erkennt, aber erst zu einem Zeitpunkt an dem eine Behandlung der Wolken nicht mehr zielführend ist, versagt. Es ist denkbar, dass sich gewisse Wolkensysteme mit den derzeitigen Möglichkeiten gar nicht beeinflussen lassen. In diesem Fall ist zwar eine Warnung wünschenswert, auf eine Behandlung kann aber verzichtet werden. Hier liegt die Herausforderung. Die Hagelzellen müssen in einem derart frühen Entwicklungsstadium erkannt werden, dass Maßnahmen eingeleitet werden können, die die Bildung der Hydrometeore gezielt beeinflussen. Unterschiedliche Wolkentypen müssen möglicherweise zu anderen Zeiten und an anderen Orten innerhalb der Wolke behandelt werden. Dies sollte von einem Seeding-Kriterium ebenfalls berücksichtigt werden.

Glücklicherweise kann für die Zwecke der Evaluierung auf Prognosen verzichtet werden, weil ausschließlich vergangene Wettersituationen betrachtet werden. Für den operationellen Betrieb von Hagelabwehr-Projekten müssen möglicherweise Vorhersagen erstellt werden, um Seeding-Gegebenheiten rechtzeitig melden zu können.

In Kapitel 4 wurden einige Möglichkeiten zur Differenzierung zwischen Regen- und Hagelzellen erläutert. Die Entwicklung eines Seeding-Kriteriums läuft folgendermaßen ab:

1. Schaffen eines Datenvorrats mit bestätigten Hagel-Ereignissen am Boden. Ort und Zeitpunkt müssen bekannt sein. Es darf kein Seeding stattgefunden haben.
2. Schaffen eines Datenvorrats mit Gewittern ohne Hagel am Boden. Die Information, dass kein Hagel stattgefunden hat, muss gesichert sein. Ort und Zeitpunkt müssen bekannt sein. Es darf kein Seeding stattgefunden haben.
3. Untersuchen der beiden Datenmengen auf Unterschiede.
4. Entscheiden, ob bzw. welche Maßnahmen zu treffen sind.

Zum ersten Punkt wurde bereits in Kapitel 3 Stellung genommen. Neben den Hageltestplatten dienen vor allem die Schadensmeldungen der Österreichischen Hagelversicherung als Bestätigung für Hagel am Boden. Die Herausforderung der Zellenzuordnung zu getroffenen Gemeinden wurde in Kapitel 3.7 bzw. Anhang B erläutert. Generell sind die Angaben der Versicherung auf Plausibilität zu überprüfen. Wurden an einem Tag viele Schäden gemeldet, so kann man davon ausgehen, dass die Angaben korrekt sind. Liegen jedoch nur wenige Schadensmeldungen vor, so kann das angegebene Schadensdatum durchaus falsch sein, besonders wenn der Hagel nachts fiel, eventuell sogar vor und nach Mitternacht. Weiters kann es vorkommen, dass ein Versicherungsnehmer in Gemeinde X gemeldet ist, das versicherte Grundstück aber in der Gemeinde Y liegt. Auch dann können Abweichungen auftreten.

Die Versicherungsmeldungen können vor allem mit Hilfe der Radarbilder verifiziert werden. Im Jahr 2009 wurden an 121 Hageltagen 6961 Schäden in den südlichen und östlichen Bezirken der Steiermark gemeldet. An 43 Tagen liegen gute Radarbilder vor, an 26 Tagen sind die Meldungen zu hinterfragen und an 52 Tagen liegen keine Radardaten vor. Somit bleiben von 121 gemeldeten Hageltagen nur 43 Tage für eine genauere Betrachtung übrig (siehe Anhang C). Unter Umständen müssen sogar noch mehr Tage ausgemustert werden, wenn weitere Diskrepanzen auftreten. 2010 wurden 2657 Schäden an 74 Hageltagen gemeldet. 24 Tage scheinen sehr brauchbar, 32 Tage sind zu hinterfragen und an 18 Tagen liegt kein Radarbild vor. Das zeigt, dass es notwendig ist die Daten von mehreren Jahren vorliegen zu haben, um genügend Ereignisse untersuchen zu können. Die natürliche Schwankung der meteorologischen Ereignisse ist ein weiterer Grund für die Notwendigkeit eines mehrjährigen Untersuchungszeitraums.

Es liegt auf der Hand, zu Beginn dieses Entwicklungs-Prozesses einige bereits bekannte Methoden auf ihre Fähigkeit zu testen. Möglicherweise werden durch kleine Anpassungen an die lokalen Bedingungen bereits zufriedenstellende Ergebnisse erreicht und es kann auf die Entwicklung eines eigenen Kriteriums zur Differenzierung zwischen Regen- und Hagelzellen verzichtet werden.

Iwan Holleman (2001) vom KNMI<sup>2</sup> untersuchte verschiedene Methoden zur Differenzierung zwischen Regen- und Hagelzellen. Zu diesem Zweck wurden 15 Tage mit meist heftigen Gewittern in den Niederlanden betrachtet. Holleman verfügte über 3D-Wetterradardaten, Meteosat-IR-Daten<sup>3</sup> sowie

<sup>2</sup> Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut

<sup>3</sup> Satellitenmessungen im Infrarot Bereich liefern die Temperatur der Wolkenobergrenze

Messwerte einer Radiosonde<sup>4</sup>. Wetterstationen lieferten Regenmengen und berichten Hagel. Freiwillige und Versicherungen meldeten ebenfalls Hagelereignisse. Außerdem stand Holleman das numerische Wettervorhersage-Werkzeug HiRLAM<sup>5</sup> zur Verfügung. Zur Bestimmung einer gewissen Hagelgefährdung wurden besonders die Methoden nach Waldvogel und Auer als erfolversprechend genannt. In den nächsten Unterkapiteln wird versucht diese Methoden auf die Steiermark anzuwenden.

### 6.1.1 Die Methode nach Waldvogel

Das Waldvogel-Kriterium besagt, dass eine gewisse Hagelgefahr besteht, wenn:

$$H_{45} \geq H_0 + 1,4 \text{ km} \quad (6.1)$$

$H_{45}$  bezeichnet die obere Grenze des Bereiches in einer Wolke mit einer Reflektivität von 45 dBZ.  $H_0$  steht für die Höhe der 0-°C-Isotherme (Kapitel 4.4).

Am 13.6.2010 lag die 0-°C-Grenze in der Steiermark bei 4000 m (Anhang A). In den Diagrammen 6.1 und 6.2 wird jeweils der Waldvogel-Parameter  $\Delta H = H_{45} - H_0$  über die Zeit dargestellt. Zum Zeitpunkt Null wurde in der Zelle erstmals eine Reflektivität von 30 dBZ überschritten. In 6.1 nimmt der Waldvogel-Parameter nach 250 Minuten stark ab. Die Zelle verlässt die Steiermark, nimmt noch einmal an Kraft auf und löst sich nach weiteren 100 Minuten auf (nicht dargestellt). Mit Hilfe von Versicherungsmeldungen konnten der Zelle zwei gesicherte Hagel-Ereignisse zugeschrieben werden (vgl. Anhang B): 18:25 UTC Röthelstein, 18:50 UTC Gasen. Seeding-Informationen und HTP-Auswertungen standen nicht zur Verfügung. Es handelt sich um eine Multizelle<sup>6</sup>, wobei jeweils die höchste oder stärkste Zone berücksichtigt wurde. 6.2 zeigt eine kleinere Zelle<sup>7</sup> wobei wiederum keine Informationen über Hagel bzw. Seeding vorlagen.

Der Waldvogel-Parameter  $\Delta H$  ist in Abbildung 6.1 teilweise sehr hoch. Die Wahrscheinlichkeit eines Hagelereignisses nach Waldvogel ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Demnach liegt die größte Hagelwahrscheinlichkeit etwa bei  $\Delta H = 4 \text{ km}$ , für  $\Delta H > 7 \text{ km}$  geht die Wahrscheinlichkeit gegen Null. Ähnliches gilt für die Probability of Hail (POH) nach Wieringa und Holleman (2006) in Abbildung 4.4. Dies steht im Widerspruch zu dem gezeigten Beispiel. Die Hagelwahrscheinlichkeit bei NEXRAD (Abbildung 4.3) bestätigt wiederum die hohe Hagelwahrscheinlichkeit bei hohen  $\Delta H$ -Werten.

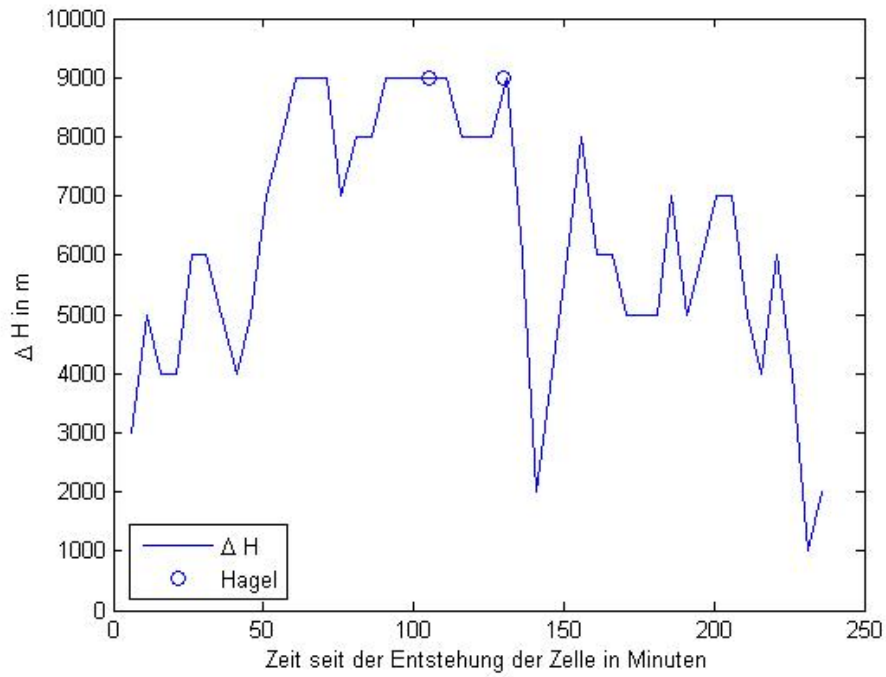
Die gezeigten Diagramme sind nicht repräsentativ, da die notwendigen Seeding-Informationen nicht berücksichtigt werden konnten. Ebenso wäre die Einbindung von HTP-Auswertungen oder anderen gesicherten Hagelmeldungen wünschenswert. In Diagramm 6.2 kann nicht davon ausgegangen werden, dass kein Hagel am Boden auftrat. Die gezeigten Beispiele dienen als Anschauungsmaterial und zeigen eine graphische Methode zum Festlegen eines „steirischen Waldvogel-Kriteriums“.

<sup>4</sup> Radiosonde an einem Wetterballon

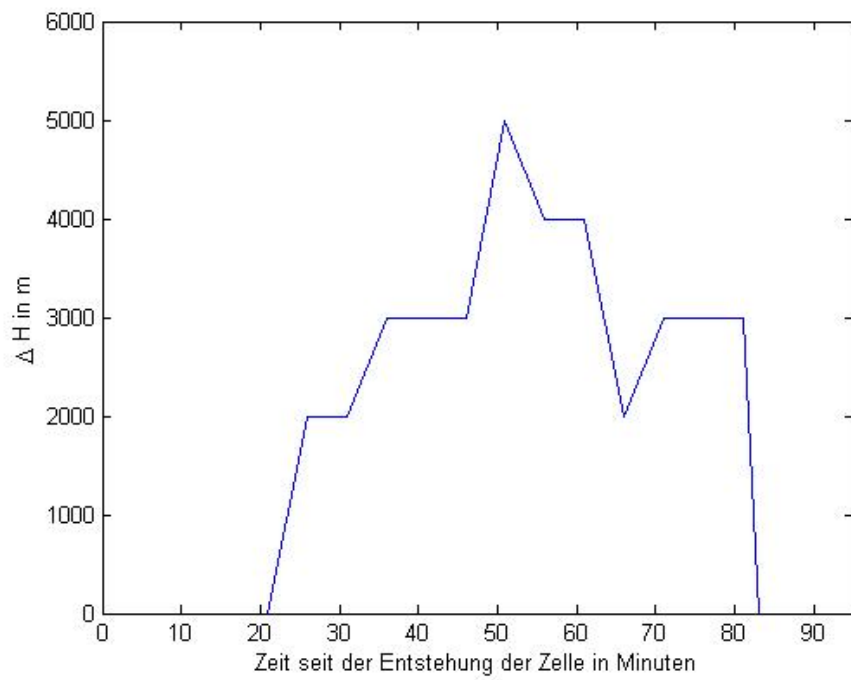
<sup>5</sup> High Resolution Local Area Modelling

<sup>6</sup> Auf der beigelegten CD findet sich die Datei: Fallbeispiel\_A.xlsx. Beschrieben wird Zelle C.

<sup>7</sup> Fallbeispiel\_A.xlsx: Zelle G



**Abbildung 6.1:** Unterscheidung Regen- Hagelereignis nach Waldvogel



**Abbildung 6.2:** Unterscheidung Regen- Hagelereignis nach Waldvogel



### 6.1.2 Die Methode nach Auer

Es wird versucht eine Unterscheidung von Regen- und Hagelzellen nach der Methode von Auer (Kapitel 4.5) vorzunehmen. Das Kriterium nach Auer besagt: „Wenn die Summe von Temperatur ( $< 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) und der doppelten Reflektivität (dBZ) größer 60 ergibt, wird Hagel erwartet“ (Auer 1994). Zum Zeitpunkt dieser Arbeit lagen die HTP-Auswertungen für die Jahre 2008-2010 noch nicht vor. Da für die Jahre vor 2009 die Seeding-Aktivitäten noch nicht in Form von GPS-Daten vorhanden sind, wurde lediglich das Jahr 2007 untersucht. Die Methode von Auer erfordert die Kenntnis von gesicherten Hagelereignissen am Boden. Diese liegen in Form von HTP vor. 2007 wurden 19 Stationen im Raum Weiz-Gleisdorf getroffen. Drei dieser Hagelschläge kann kein Radarbild zugeordnet werden, es bleiben also 16 räumlich sehr präzise beschriebene Hagelereignisse. Glücklicherweise konnten allen getroffenen HTP eindeutig die verursachenden Zellen zugeordnet werden. Tabelle 6.1 zeigt einen Auszug der getroffenen Hageltestplatten im Bereich Weiz-Gleisdorf des Jahres 2007. Für jede getroffene HTP wurde eine nicht getroffene HTP in der Nähe zum Vergleich mit in die Tabelle aufgenommen.

Die Diagramme 6.3 und 6.4 beinhalten Regen- und Hagelzellen. In 6.3 wird die Temperatur an der Wolkenobergrenze  $T_{top}$  der Reflektivität in 3500 m Höhe  $Z_{3500}$  [dB] gegenübergestellt. In Diagramm 6.4 wurde  $T_{top}$  über der maximalen Reflektivität  $Z_{max}$  [dB] aufgetragen.

In beiden Fällen ist es nicht möglich ein Kriterium für eine Unterscheidung festzulegen. Die gezeigten Beispiele sind nicht repräsentativ und dienen lediglich als Anschauungsbeispiele. Folgende Gründe sind zu nennen: Erstens wurden keine Seeding-Informationen berücksichtigt. Dadurch sind die Messwerte möglicherweise durch Seeding beeinflusst und dürfen nicht für eine Auswertung verwendet werden. Die betrachteten Situationen müssen frei von Hagelabwehrmaßnahmen sein. Zweitens wurden nur 16 Hagelereignisse eines einzigen Tages untersucht, das ist bei meteorologischen Betrachtungen nicht ausreichend. Und drittens: Beim Auslesen der Temperaturen und Reflektivitäten wurden keine räumlichen Toleranzen gewährt. Die Satellitenbilder werden alle 30 Minuten aktualisiert, in diesem Zeitraum kann die Wolke um einiges weiterziehen. Wird eine durchschnittliche Geschwindigkeit von  $30 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  angenommen, so kann die Zelle einen Weg von 15 km zurückgelegt haben. Es wird empfohlen beim Auslesen der Werte einen gewissen Radius vorzugeben, innerhalb dessen jeweils der höchste Wert berücksichtigt wird. Es muss jedoch sichergestellt werden, dass nicht die Werte einer eventuell vorhandenen Nachbarzelle betrachtet werden.

Station	Datum	Länge N	Breite O	Ort (Google Earth)	Uhrzeit	$Z_{max}$ [dB]	$Z_{3500}$ [dB]	Cloud Top Temp. [°C]	Hagel
STK V1	26.05.2007	15,284722	47,160278	Hörgasgraben	19:05	50,2	46	-13,5	Ja
STK V2	26.05.2007	15,292778	47,150000	Enzenbach	19:15	50,2	46	-17,5	Ja
STK W1	26.05.2007	15,710556	47,291111	Baierdorf-Umgebung	17:50	46	46	-13,5	Ja
STK X2	26.05.2007	15,710000	47,272500	Fresen	17:50	50,2	50,2	-10	Ja
STK Y5	26.05.2007	15,784722	47,236111	Auerberg	20:00	41,8	38	-55,5	Ja
STK G3	26.05.2007	15,549444	47,154444	Frindorf	19:15	50,2	46	-47,5	Ja
STK G6	26.05.2007	15,627222	47,133333	Bachberg	19:30	50,2	50,2	-40	Ja
STK H4	26.05.2007	15,558889	47,129167	Unter Prellerberg	19:15	50,2	50,2	-40	Ja
STK L10	26.05.2007	15,687500	47,030556	Mareinberg	19:20	34,2	30	-13,5	Ja
STK X1	26.05.2007	15,689444	47,280556	Rohrach	17:45	46	46	-7	Nein
STK Y1	26.05.2007	15,688056	47,260833	Trog	17:50	46	46	-7	Nein
STK Y2	26.05.2007	15,712778	47,259444	Feistritz bei Anger	17:50	50,2	50,2	-7	Nein
STK G4	26.05.2007	15,569444	47,145556	Dornhofen	19:15	46	46	-47,5	Nein
STK G5	26.05.2007	15,593333	47,137778	Volkersdorf	19:20	50,2	46	-40	Nein
STK H5	26.05.2007	15,583333	47,122500	Hart-Purgstall	19:20	50,2	46	-43,5	Nein
STK K11	26.05.2007	15,707222	47,044167	Kaplanberg	19:20	38	34,2	-10	Nein
STK A10	26.05.2007	15,787222	47,213056	Siegersdorf / Herberstein	19:55	41,8	41,8	-55,5	Nein
STK V3	26.05.2007	15,295000	47,126111	Tallak	19:20	30	19,5	-17,5	Nein
STK A8	08.06.2007	15,723333	47,230556	Puch bei Weiz	15:15	50,2	46	-28,5	Ja
STK P1	08.06.2007	15,746111	47,227500	Höfling	15:15	46	46	-28,5	Ja
STK A9	08.06.2007	15,745278	47,218333	Vorderkulm	15:15	46	46	-28,5	Nein
STK A7	08.06.2007	15,696667	47,234167	Bachl	15:25	46	46	-32	Nein
STK B7	08.06.2007	15,698056	47,221111	Perndorf	15:25	46	41,8	-32	Nein
STK X3	09.07.2007	15,748056	47,265000	Floing	14:55	54,3	54,3	-7	Ja
STK X4	09.07.2007	15,776667	47,260833	Winkelhöf	14:55	50,2	50,2	-7	Nein
STK Y3	09.07.2007	15,733333	47,250556	Lebing	14:55	54,3	50,2	-7	Nein

Tabelle 6.1: Auswertung der Hageltestplatten 2007 (Auszug). Quelle: ZAMG

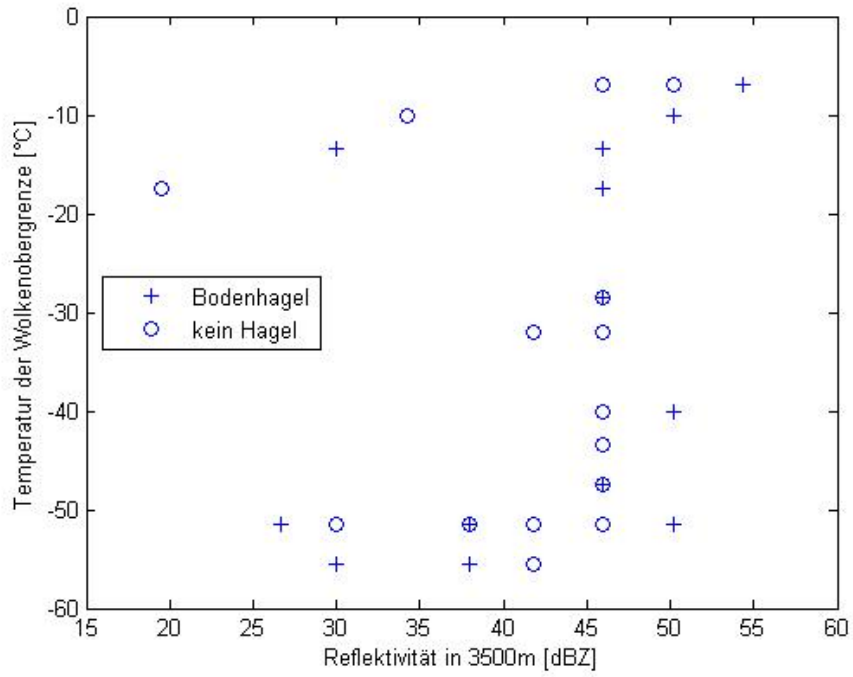


Abbildung 6.3: Unterscheidung Regen- Hagelereignis anhand von  $T_{top}$  und  $Z_{3500}$  (Auer)

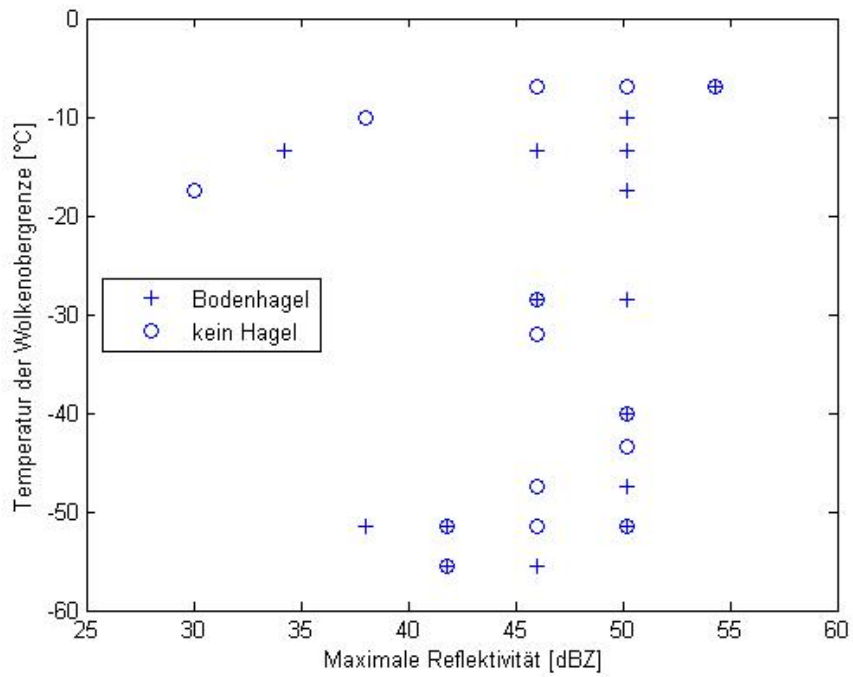


Abbildung 6.4: Unterscheidung Regen- Hagelereignis anhand von  $T_{top}$  und  $Z_{max}$  (Auer)

## 6.2 Automatisierte Zellenverfolgung

Die konvektiven Zellen müssen in Raum und Zeit verfolgt werden können. Dabei müssen verschiedene Parameter dokumentiert werden. Die Parameter, die für die Beschreibung einer Gewitterzelle interessant sind, gilt es zu finden. Denkbar sind z.B.: Maximale Reflektivität, Regenrate und einige geometrische Abmessungen. Eine Voraussetzung dafür ist eine Zellendefinition. Die Zellen können von sehr unterschiedlicher Größe sein, es gibt Einzellen-, Mehrzellen- und Superzellengewitter. In Abbildung 2.3 ist über Hartberg eine große Zelle zu sehen, über Weiz kann man – je nach Definition – drei Einzelzellen, oder ein Mehrzellensystem erkennen. Gewitterfronten können eine Breite von zig Kilometern erreichen. Bei der Zellendefinition muss bestimmt werden, welche Schwellwerte bzw. Radien herangezogen werden, ob Mehrzellensysteme erlaubt sind, ob sich Zellen vereinigen und trennen dürfen, ob ein gewisser Abstand zu benachbarten Zellen eingehalten werden muss, wie groß der Einzugsradius ist wenn VIL berechnet wird usw.

Es gibt zwei Arten der Radar-basierten-Methode. Die „Flächenschwerpunkt“-Methode (engl. centroid) arbeitet mit geometrischen Abmessungen, um Zellen zu identifizieren. Die „Kreuz-Korrelation“-Methode (eng. cross correlation) nutzt 2D-Bilder, um Bewegungsvektoren zu erstellen. Die zweite Möglichkeit liefert etwas bessere Geschwindigkeits- und Richtungsinformationen der Radar-Echos. TITAN und MHT (siehe unten) sind „centroid“-Typen, es gibt aber auch Kombinationen aus beiden.

Die „Thunderstorm Identification Tracking And Nowcasting (TITAN)“-Software arbeitet ausschließlich mit Radarbildern. Zellen werden anhand von Reflektivitäts-Schwellwerten identifiziert. Die Zelltrennung und -vereinigung wird mit geometrischen Funktionen bearbeitet, die Software ist Flächenschwerpunkt-basiert. TITAN kann einzelne Zellen innerhalb von Mehrzellensystemen unterscheiden, gewisse Parameter dokumentieren und kurzfristige Prognosen erstellen.

Root et al. (2011) entwickelten die Cell-Tracking-Software „Multiple Hypothesis Tracking (MHT)“. Die Software arbeitet ebenfalls ausschließlich mit Radarbildern und wurde im Internet auf der Seite <https://github.com><sup>8</sup> veröffentlicht.

Steinacker et al. (1999) entwickelten am Institut für Meteorologie und Geophysik an der Universität Wien eine Software, die es ermöglicht, konvektive Zellen und Zellenkomplexe anhand von Blitz- und Radardaten zu verfolgen. In einem ersten Schritt werden dazu die Daten der Blitzortung und die Radardaten bezüglich räumlicher und zeitlicher Auflösung homogenisiert. Das ermöglicht den Vergleich von Blitzdichte und Regenrate. Ein zweiter Schritt glättet die Daten über ein Gaußfilter. Ein Gewichtungsfaktor ermöglicht eine variable Einstellung der „halben Breite“ des Filters. So kann entschieden werden, ob viele konvektive Zellen (schmales Filter) oder nur Zellenkomplexe (breites Filter) identifiziert werden. Maxima (Zellen) werden bestimmt, wenn ein gewisser Schwellwert überschritten wird, und anhand verschiedener Kriterien wird die wahrscheinlichste Zugbahn berechnet. Diese Kriterien können beinhalten, dass sich Zellen nicht vereinen bzw. teilen dürfen, um sicher zu stellen, dass nur ein Zugvektor pro Zelle erstellt wird. Auch kann eine Zelle nicht weiter vorrücken, als es die Windgeschwindigkeit im 600-hPa-Level erlaubt.

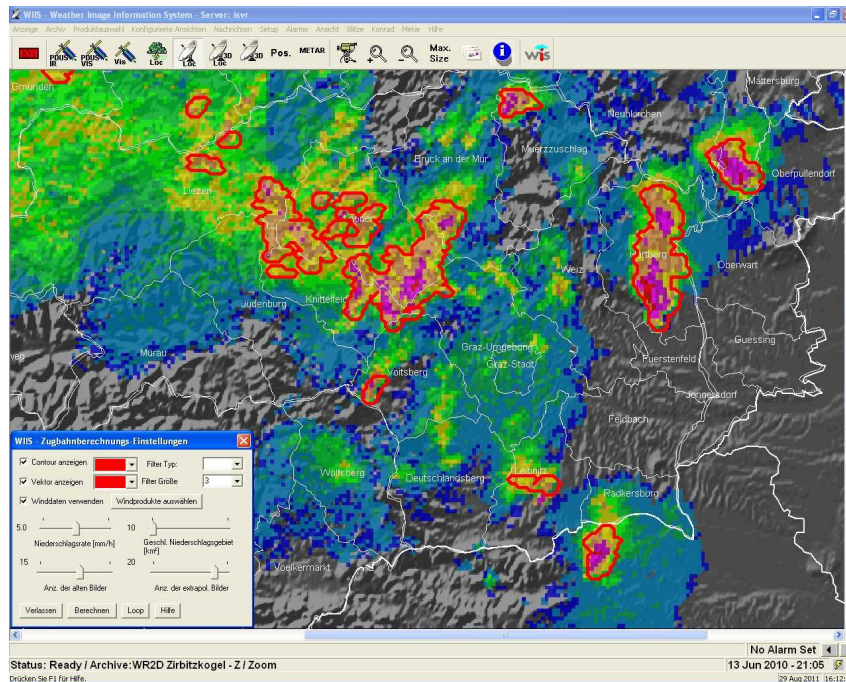
<sup>8</sup> <https://github.com/WeatherGod> bzw. WebCitation: <http://www.webcitation.org/6093eJaZP>

Wird davon ausgegangen, dass das steirische Seeding-Kriterium (fast) alle potentiellen Hagelzellen aufspürt, so ist es ausreichend jedes Mal, wenn dieses Kriterium erfüllt wird, eine neue Zelle zu definieren und zu verfolgen. Die Herausforderung liegt darin, eine möglichst hohe Auflösung zu erreichen, also Multizellen und Einzelzellen möglichst gut unterscheiden zu können und wenn möglich nur eine Zugbahn zuzulassen. Oft spalten sich Teile einer Zelle ab. Sie zeigen anfangs noch eine sehr hohe Reflektivität, lösen sich aber nach einigen Kilometern auf. Möglicherweise kann auf eine Definition dieser Abspaltungen als eigene Zelle verzichtet werden. Hierfür muss eine Mindestlebensdauer der Zellen festgelegt werden, denn die abgespaltenen Teile erfüllen in den meisten Fällen zumindest für kurze Zeit verschiedene Seeding-Kriterien.

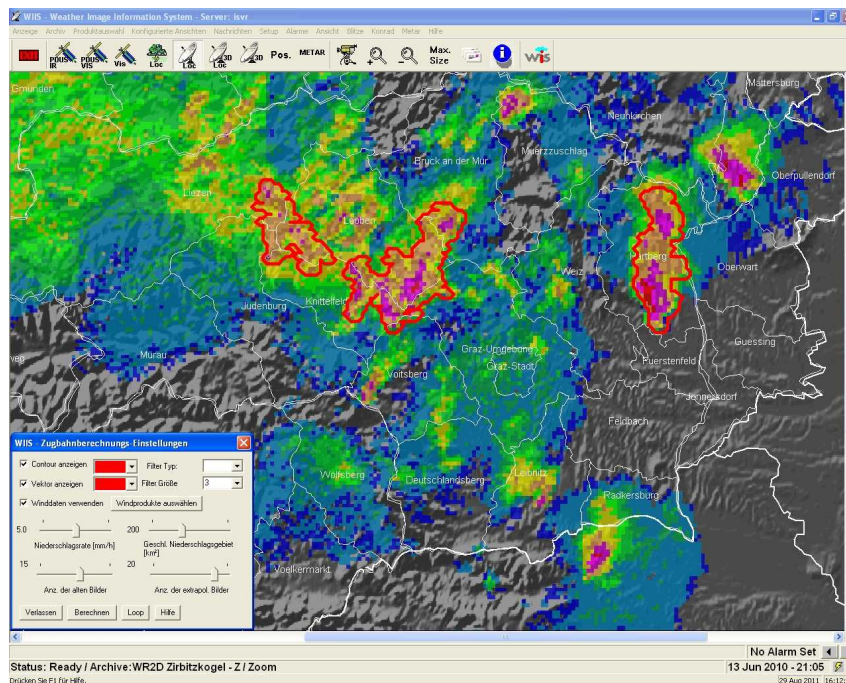
Die Verfolgung von größeren Wolkensystemen stellt weniger Probleme dar, da es nicht so sehr ins Gewicht fällt, wenn sich innerhalb eines Systems die Zellen verschieben, sich voneinander entfernen und wieder zusammenziehen. Ganze Wolkensysteme können mit Hilfe von Blitzortungen verfolgt werden (vgl. Wakonigg 2010, NRC, Mayer 2005). Hilfreich kann auch die Erkenntnis sein, wonach sich Gewitterwolken durchschnittlich  $30^\circ$  rechts zur Windrichtung in ca. 4 km Höhe (600-hPa-Level) ausbreiten (Dessens 1998). Grund dafür ist die Corioliskraft (Erddrehung). In den Abbildungen 6.5 und 6.6 wird eine Zellendefinition mittels Radardaten gezeigt. Als Kriterien kommen die Niederschlagsrate bzw. die geschlossene Niederschlagsfläche zur Anwendung. In Abbildung 6.5 werden 16 Zellen definiert. Als Voraussetzung für die Definition einer Zelle wurden eine minimale Regenrate von  $5 \frac{mm}{h}$  und eine geschlossene Niederschlagsfläche von mindestens  $10 \text{ km}^2$  festgelegt. Wird die Niederschlagsfläche auf  $200 \text{ km}^2$  erhöht, so reduziert sich die Anzahl der Zellen auf drei. Das gezeigte Beispiel beinhaltet keine Höheninformationen. Wird als Kriterium zusätzlich eine Mindesthöhe des Wolkenturms mit eingebunden, so kann die Auswahl besser auf konvektive Zellen beschränkt werden. Diese Einschränkung erschwert allerdings die Früherkennung der potentiellen Hagelzellen.

Das Problem liegt weniger in der Definition einer Zelle zu einem bestimmten Zeitpunkt, sondern in der Verfolgung über die Zeit, da sich sehr viele Parameter stark verändern. Es müssen verschiedene Kriterien erstellt werden, um Multizellen von Einzelzellen unterscheiden zu können. Die Zellen müssen klassifiziert werden. Zu einem späteren Zeitpunkt – bei der Evaluierung – werden ähnliche Zellen miteinander verglichen, also sollte möglichst gleich eine feine Unterscheidung getroffen werden.

Generell liegt die Herausforderung bei allen Methoden darin, die Zellen auch dann unterscheiden zu können, wenn sie sehr dicht zusammen liegen, ihre Form schnell verändern oder wenn sich Zellen häufig vereinen oder aufspalten. Wenn klar ist, wie die jeweiligen Zellen definiert sind, können die verschiedenen Parameter relativ einfach dokumentiert werden.



**Abbildung 6.5:** Zellendefinition mittels Radarbildern. Niederschlagsrate (mind.): 5 mm/h. Geschlossenes Niederschlagsgebiet (mind.): 10 km<sup>2</sup>. Quelle: WIIS



**Abbildung 6.6:** Zellendefinition mittels Radarbildern. Niederschlagsrate (mind.): 5 mm/h. Geschlossenes Niederschlagsgebiet (mind.): 200 km<sup>2</sup>. Quelle: WIIS

### 6.3 Zellen mit Seeding-Informationen überlagern

In den vorangegangenen Punkten wurden die konvektiven Zellen erkannt, es wurde ihnen eine gewisse Hagelwahrscheinlichkeit zugewiesen und anhand von verschiedenen Parametern wurde entschieden, ob und in welcher Weise die Zellen behandelt werden sollen. Dies stellt die Entwicklung des Seeding-Kriteriums dar. Im darauffolgenden Punkt wurde besprochen, wie die potentiellen Hagelzellen über die Zeit verfolgt werden können. Die Entwicklung des Auswerte-Werkzeugs ist nun an der Stelle angelangt, an der alle „interessanten“ Zellen erkannt und klassifiziert wurden. Einige Parameter wurden dokumentiert und stehen für eine Auswertung bereit. Den Zellen müssen nun noch möglichst viele Eigenschaften und Informationen zugewiesen werden. Einige der denkbaren Parameter lauten: Größe der Zelle, Lebensdauer der Zelle, erhaltene Menge an AgJ, Entwicklungsstadium der Zelle zum Zeitpunkt des ersten Seedings, Zeitpunkte und Aufenthaltsorte zum Zeitpunkt des bestätigten Bodenhagels usw.

Besonders die Zuordnung der Menge des AgJ zu den verschiedenen Zellen ist für eine Auswertung von Interesse. Das Ziel der Evaluierung ist, den Einfluss des Silberjodids auf die Hagelbildung zu bewerten. Die erste Frage wird lauten: *Wie lange befand sich das Flugzeug in unmittelbarer Nähe der Zelle?* Es muss berücksichtigt werden, ob zusätzlich zum Brenner auch Fackeln abgebrannt wurden. Der Radius um das Flugzeug bzw. um die Zelle, in dem das Silberjodid Einfluss zeigt, muss bestimmt werden. Den Hagelabwehr-Thesen zufolge ist es von entscheidender Wichtigkeit, in welche Teile der Zelle das AgJ gelangt, da davon die Wirksamkeit abhängt. Nach Möglichkeit sollte zwischen folgenden Gebieten unterschieden werden: Advektionszone, Aufwindzone, Vorderseite oder Rückseite der Zelle. Nachdem das AgJ ausgebracht wurde, wird es sich, je nach Windrichtung und Windstärke, weiter in der Atmosphäre verteilen. Dies gilt es zu berücksichtigen, besonders um Kontamination von vermeintlich unbehandelten Zellen zu vermeiden.

### 6.4 Evaluierungsansätze

In Kapitel 5 wurden verschiedene Möglichkeiten der Evaluierung vorgestellt, wobei die Auswertung der Hageltestplatten von Otto Svabik (2001) bereits in der Steiermark stattgefunden hat. Die anderen Methoden sollen auf ihre Anwendbarkeit im Schutzgebiet der Plattform Hagelabwehr Steiermark überprüft werden.

#### 6.4.1 Evaluierung mit Versicherungsdaten

Die Evaluierung von Hagelabwehr-Programmen mittels Versicherungsdaten wurde in Kapitel 5.2.3 besprochen. Diese Methode ist sehr beliebt, beruht allerdings lediglich auf indirekten Auswirkungen der getroffenen Maßnahmen. Es werden keine direkten Messungen mit eingebunden, meist werden nur eingezahlte und ausbezahlte Prämien gegenübergestellt. Die Methode lässt sich etwas verfeinern, wenn die Anzahl der Hageltage, die Anzahl der Einsatztage usw. mit einbezogen werden.

Bei der Evaluierung der Hagelabwehr in der Steiermark sollen möglichst physikalische Parameter (besonders Radardaten) herangezogen werden, weshalb die Methode des Vergleichs von Versicherungsdaten aus verschiedenen Perioden an dieser Stelle nicht weiter erläutert wird. Auf jeden Fall ist es interessant ein Ergebnis einer solchen Auswertung mit den Ergebnissen anderer Ansätze zu vergleichen.

### 6.4.2 Evaluierung mit einem Vergleichsgebiet

Die Methode der Evaluierung mit einem Vergleichsgebiet (Kapitel 5.2.2) bedarf einiger Voraussetzungen. Die wichtigsten sind, dass das Schutzgebiet und das Vergleichsgebiet sehr ähnlich in Bezug auf Größe, Hagel-Auftrittswahrscheinlichkeit und verschiedene topographische Verhältnisse sind. In der Steiermark zieht der überwiegende Anteil der Gewitter aus westlicher Richtung<sup>9</sup> ein. Ein Vergleichsgebiet muss dem Schutzgebiet vorgelagert sein, um keiner Kontamination durch AgJ zu unterliegen. Das bedeutet, dass ein Gebiet mit der Ausdehnung von ca. 70 km x 50 km westlich von Voitsberg zum Vergleich herangezogen werden müsste. Die geographischen Verhältnisse, besonders durch die Berge und die Nähe zu den Bergen, entsprechen in dieser Gegend nicht den Anforderungen. Oft entstehen die konvektiven Zellen genau in diesem Bereich. Am ehesten eignet sich als Vergleichsgebiet der Bezirk Deutschlandsberg, wobei jedoch zu beachten ist, dass dort aktive Hagelabwehr betrieben wird. Möglicherweise können ausgewählte Tage für eine Evaluierung herangezogen werden, wenn in diesem Gebiet keine Maßnahmen zur Hagelabwehr stattgefunden haben und die Gewitter von Süd-West nach Nord-Ost gezogen sind.

### 6.4.3 Evaluierungsansatz nach Dessens

Die Methode nach Dessens (Kapitel 5.5) beurteilt die Wirksamkeit von Hagelabwehrmaßnahmen anhand der Anzahl der Hagelkörner mit einem Durchmesser von mindestens 0,7 cm. In Frankreich wurden alle Zellen, die das Seeding-Kriterium erfüllten, mit Bodengeneratoren behandelt, deshalb war es nicht möglich behandelte- und unbehandelte Zellen miteinander zu vergleichen. Stattdessen wurden Zellen, die überdurchschnittlich viel AgJ erhielten, mit solchen, die eine unterdurchschnittliche Menge an Silberjodid erhielten, verglichen. In der Steiermark können die Zellen in drei Gruppen unterteilt werden:

- überdurchschnittlich viel AgJ erhalten
- unterdurchschnittlich viel AgJ erhalten
- kein AgJ erhalten

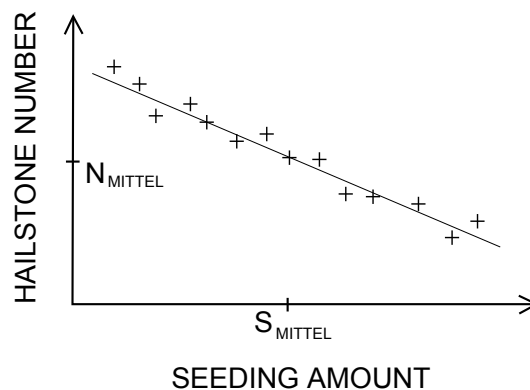
Diesen drei Gruppen werden nun Hagelereignisse zugewiesen und es wird die Anzahl der Hagelkörner mit einem Durchmesser von mindestens 0,7 cm verglichen. Die Einteilung in Gruppen ist nicht zwingend notwendig, es können auch die „analogen“ Werte für eine Auswertung verwendet werden. Dies wird in Abbildung 6.7 schematisch dargestellt.

---

<sup>9</sup> Nord-West bis Süd-West



Verursachen Zellen, die mehr AgJ erhalten haben, eine geringere Anzahl von Hagelkörnern ( $D > 0,7 \text{ cm}$ ) am Boden als jene Zellen, die wenig bzw. kein Silberjodid erhalten haben? Die Anzahl der Hagelkörner kann nur mit Hageltestplatten bestimmt werden. Im Schutzgebiet der Plattform Hagelabwehr Steiermark sind aktuell 181 HTP-Stationen aufgestellt, diese bedecken jedoch nicht einmal 50 % des gesamten Gebiets. Wenn es gelingt, den drei Gruppen genügend viele Hagelereignisse<sup>10</sup> zuzuweisen, kann die Methode nach Dessens durchaus in der Steiermark angewandt werden. Ein Vorteil dieses Evaluierungsansatzes liegt darin, dass alle ausgewerteten Zellen über demselben Gebiet betrachtet werden, was für Vergleiche von meteorologischen Ereignissen besonders wünschenswert ist, da zumindest die topographischen Voraussetzungen ident sind. Besonders erfreulich bei dieser Methode ist auch, dass bei der Analyse die Anzahl der Hagelkörner am Boden mit einfließt. Es wird die Wirksamkeit von Silberjodid direkt an Auswirkungen bei Hagelkörnern bewertet. Zu beachten gilt es, dass die Methode für Bodengeneratoren entwickelt wurde, in der Steiermark aber Flugzeuge eingesetzt werden. Das sollte sich insofern bemerkbar machen, dass das Silberjodid wesentlich schneller in den Wolken ankommt, jedoch mit unterschiedlicher Intensität.



**Abbildung 6.7:** „Analoge“ Auswertung von getroffenen HTP mit der Menge von AgJ die in die hagelverursachenden Zellen eingebracht wurden. (fiktiv)

#### 6.4.4 Betrachten der Niederschlagsmenge

Woodley und Rosenfeld (2003) bewerteten zwei Programme zur Erhöhung der Niederschlagsmenge in Texas (Kapitel 5.6). Stimmt die Annahme, dass eine Erhöhung der Niederschlagsmenge eine Reduktion der Hagelmenge bedeutet, so kann auch dieser Ansatz in der Steiermark zur Anwendung kommen.

In Texas wurden alle potentiellen Hagelzellen mit einem Radius von 25 km versehen und die Regenraten innerhalb dieser Felder wurden über die Zeit verfolgt. Ausgewertet wurde die Gesamt-Regenmenge von behandelten bzw. unbehandelten Feldern. Bei der Unterscheidung zwischen „behandelt“ und „unbe-

<sup>10</sup> Für statistisch aussagekräftige Ergebnisse

handelt“ muss genauestens darauf geachtet werden, dass Kontamination vermieden wird. Unbehandelte Zellen mussten in Texas zu jeder Zeit einen Mindestabstand von 25 km zu behandelten Zellen einhalten. Werden die Zellen in mehrere Gruppen unterteilt, z.B. viel, wenig und kein AgJ erhalten, so wird dieses Problem etwas abgeschwächt. Die Regenmenge wird mit der Menge des eingebrachten Silberjodids verglichen. *Bedeutet mehr AgJ auch mehr Niederschlag?* Es ist auch denkbar, auf den fest vorgegebenen Radius zu verzichten und die Zellen – je nach Fläche – in verschiedene Gruppen zu unterteilen und nicht nur die Niederschlagsmenge zu betrachten, sondern mehrere Parameter auszuwerten.

#### 6.4.5 Ein Vorschlag: Methode der dynamischen Vergleichsgebiete

Ein fix plaziertes, bzw. verschiedene, je nach Windrichtung plazierte Vergleichsgebiete können in der Steiermark aufgrund der gegebenen Verhältnisse nicht festgelegt werden<sup>11</sup>. Aus diesem Grund bietet es sich an dynamische, also bewegliche, Vergleichsgebiete einzusetzen. Es wird nicht ein unbehandeltes mit einem behandeltem Gebiet verglichen, sondern es werden alle potentiellen Hagelzellen in einem bestimmten Gebiet in eine Auswertung mit eingebunden. Die Darstellung 6.8 zeigt schematisch die Zugbahn einer konvektiven Zelle. Werden auf diese Weise für alle Zellen mit einer gewissen Hagelwahrscheinlichkeit Zugbahnen erstellt und werden dabei verschiedene Parameter und Informationen dokumentiert, so können die verfolgten Zellen miteinander verglichen werden.

Die Zellen können dabei in verschiedene Gruppen unterteilt werden:

- wenig hagelträchtig
- stark hagelträchtig

→ kann z.B. mittels Waldvogel-Parameter bestimmt werden

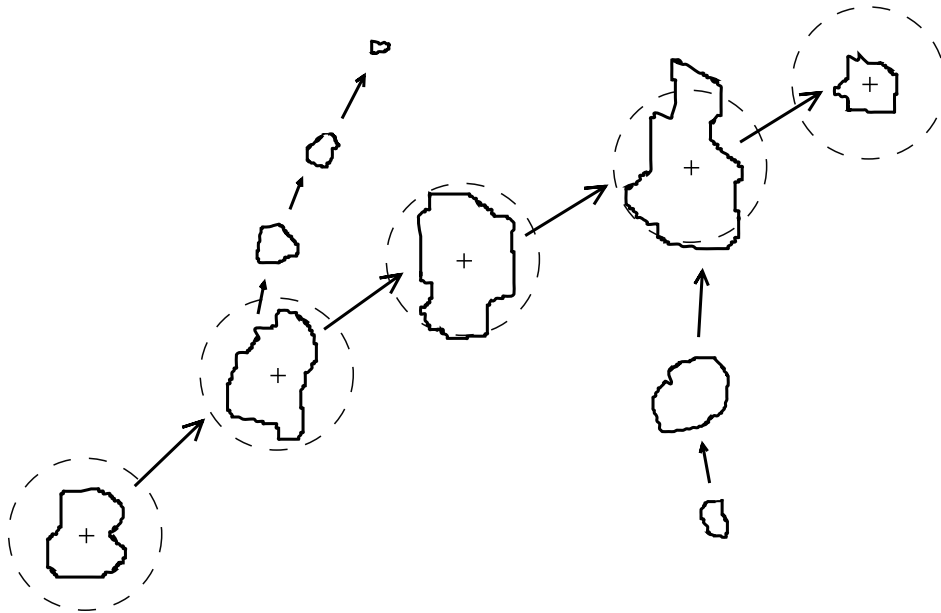
- Überdurchschnittlich viel AgJ empfangen
- Unterdurchschnittlich viel AgJ empfangen
- Kein AgJ empfangen

→ kann z.B. durch die durchschnittlich ausgebrachte Menge an AgJ auf Tages-, Monats- oder Jahresbasis bestimmt werden

Zusätzlich sollte bei jeder Art der Evaluierung immer zumindest zwischen „großen“ und „kleinen“ Gewitterzellen unterschieden werden. Der Vergleich einer einzelnen konvektiven Zelle mit einer 30 km breiten Multizellen-Front scheint nicht „fair“. Die Tabellen 6.2 und 6.3 zeigen die zu erwartenden Hagel- bzw. Regenmengen am Boden bei entsprechender Behandlung.

---

<sup>11</sup> Kapitel 5.2.2 bzw. Kapitel 6.4.2



**Abbildung 6.8:** Schematische Darstellung der Zugbahn einer konvektiven Zelle. Die ausgebrachte Menge an AgJ innerhalb des Kreises wird mit der Gesamt-Niederschlagsmenge der Zelle während ihres Lebenszyklus verglichen.

Zelle	wenig AgJ	viel AgJ
wenig trüchtig	<i>wenig Hagel</i>	<i>kein Hagel</i>
hoch trüchtig	<i>viel Hagel</i>	<i>wenig Hagel</i>

**Tabelle 6.2:** Zu erwartender Hagel am Boden bei unterschiedlicher Hagelträchtigkeit bzw. verschiedenen Mengen von eingebrachtem AgJ in konvektive Zellen

Zelle	wenig AgJ	viel AgJ
wenig trüchtig	<i>unter Durchschnitt</i>	<i>Durchschnitt</i>
hoch trüchtig	<i>Durchschnitt</i>	<i>über Durchschnitt</i>

**Tabelle 6.3:** Zu erwartende Niederschlagsmenge am Boden bei unterschiedlicher Hagelträchtigkeit bzw. verschiedenen Mengen von eingebrachtem AgJ in konvektive Zellen

Es bietet sich der Vergleich zwischen der Menge von AgJ, welche die Zellen erhalten haben, mit der Gesamt-Niederschlagsmenge, die die Zellen am Boden verursachten, an. Die bekannten Hagelabwehrthesen verlangen alle, dass die Zellen in einem frühen Entwicklungsstadium behandelt werden. Möglicherweise werden bessere Ergebnisse erzielt, wenn nicht die Menge des AgJ berechnet wird, welche die Zelle vom Erscheinen am Radar bis zum Verschwinden am Radar erhalten hat, sondern wenn nur die Menge AgJ berücksichtigt wird, die in die Zelle eingebracht wurde, bis sie „erwachsen“ wurde. Ein Vorteil der Methode mit dynamischen Vergleichsgebieten liegt darin, dass alle potentiellen Hagelzellen untersucht werden. Dadurch steht eine große Anzahl von Ereignissen zur Verfügung, was für die statistische Aussagekraft der Ergebnisse von Vorteil ist. Leider lässt die Niederschlagsrate keinen direkten Aufschluss über die Eigenschaften der Hagelkörner am Boden zu, durch die Kombination mit anderen Methoden können jedoch auch diese physikalischen Parameter eingebunden werden. So sollten zum Beispiel als erstes die Auswertungen der HTP berücksichtigt werden, die Schadensmeldungen der Versicherungen sollten miteinbezogen werden und erst an dritter Stelle sollte die, durch das Radar bestimmte, Niederschlagsmenge bewertet werden da diese nur eine grobe Abschätzung der tatsächlichen Regenmenge zulässt.

### 6.4.6 Auswirkungen von AgJ auf das Seeding-Kriterium

Bei dieser Methode der Evaluierung werden alle Zellen, die eine gewisse „Hagelträchtigkeit“ aufweisen, betrachtet. Die Zellen werden, wie in den vorangegangenen Punkten gezeigt, definiert und verfolgt. Um verschiedene Zellen miteinander vergleichen zu können, müssen diese unter anderem in den folgenden Parametern Ähnlichkeiten aufweisen:

- Niederschlagsfläche
- Höhe des Wolkenturms
- Reflektivität
- Alter bzw. Entwicklungsstadium
- gesamte Lebensdauer der Zelle<sup>12</sup>

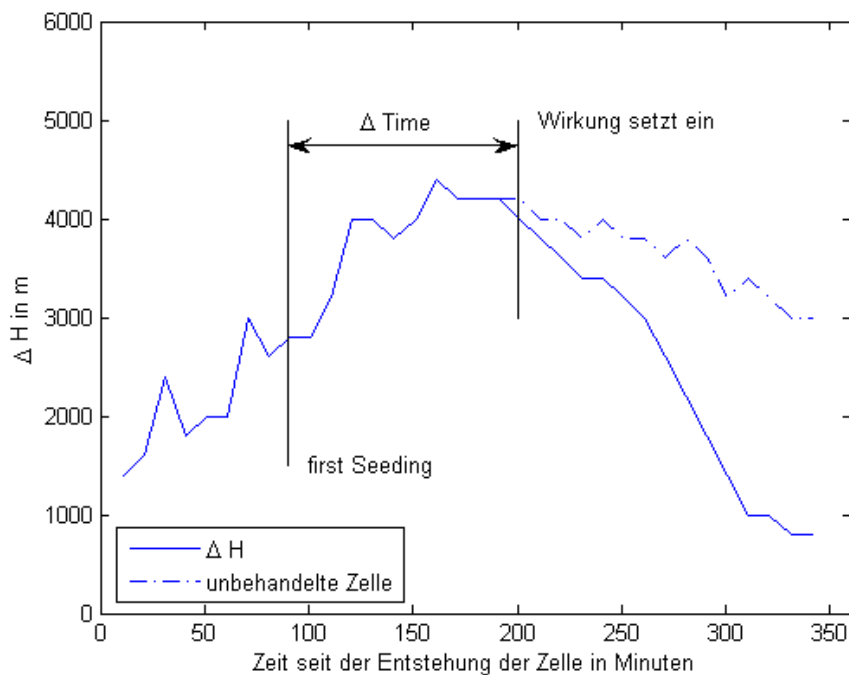
Das Seeding-Kriterium bzw. die Hagelwahrscheinlichkeit der Zellen stellen ein Maß für die Hagelgefahr dar. Wenn Seeding einen gewissen (positiven) Einfluss auf die Hagelbildung hat, so muss sich die Hagelwahrscheinlichkeit verringern, das bedeutet, das Seeding-Kriterium sollte nach einer erfolgreichen Behandlung nicht mehr erfüllt sein.

Im Diagramm 6.9 wird der Verlauf des Waldvogel-Parameters  $\Delta H$  während der gesamten Lebensdauer einer konvektiven Zelle<sup>13</sup> dargestellt. Gelingt es die Auswirkungen von Seeding auf das steirische Seeding-Kriterium in der gezeigten Weise (für viele Zellen) darzustellen, so ist der Beweis über die Wirksamkeit gelungen.

<sup>12</sup> Die Lebensdauer wird möglicherweise durch Seeding verkürzt, wenn die Wolke schneller „abregnet“.

<sup>13</sup> Es handelt sich um eine fiktive Zelle. Das Diagramm 6.9 ist als Anschauungsbeispiel gedacht.

Natürlich kann an einer einzigen Zelle nicht gezeigt werden, wie die beiden Hagelwahrscheinlichkeiten verlaufen, denn entweder wurde die Zelle behandelt oder nicht. Gelingt es aber sehr ähnliche Zellen, die unterschiedlich stark behandelt wurden, zu finden, so kann die Evaluierung in gezeigter Weise stattfinden. Dabei müssen die Ereignisse zeitlich synchronisiert werden. Als Nullpunkt sollte der Zeitpunkt gewählt werden, an dem die Zellen zum ersten Mal mit AgJ in Kontakt kamen.



**Abbildung 6.9:** Verlauf des Walvogel-Parameters in einer behandelten Zelle und – strichliert – der hypothetische Verlauf ohne Seeding (fiktiv).

## 6.5 Diskussion der Evaluierungsansätze

In diesem Kapitel wurden einige Methoden untersucht, die eine Evaluierung der Effizienz der aktiven Hagelabwehr in der Steiermark ermöglichen sollen. Um „gewöhnliche“ Regenwolken von Hagelwolken unterscheiden zu können, muss ein Seeding-Kriterium entwickelt werden. Herausforderungen bei den Methoden nach Waldvogel bzw. Auer wurden aufgezeigt. Liegt ein Seeding-Kriterium vor, so kann nicht nur der operationelle Betrieb der Hagelabwehrbetreiber vereinfacht werden, es kann auch für die Evaluierung der getroffenen Maßnahmen herangezogen werden, da es ein Maß für die Hagelgefährdung darstellt. Die in Kapitel 5 vorgestellten theoretischen Ansätze wurden auf ihre Anwendbarkeit überprüft. Angepasst an die lokalen Gegebenheiten wurden verschiedene Möglichkeiten aufgezeigt.

Die Fläche in der Steiermark, in der aktive Hagelabwehr betrieben wird, ist relativ klein. Es wird der mehrjährigen Aufzeichnung von Daten bedürfen, um genügend (behandelte und unbehandelte) Zellen für eine Bewertung vorzufinden. Im Augenblick werden die Hagelabwehr-Flugzeuge nur bei Tageslicht eingesetzt. Es kann sich herausstellen, dass zum Vergleich hauptsächlich behandelte Zellen des Tages und

unbehandelte Zellen der Nacht bereit stehen, wobei geklärt werden muss, ob dieser Vergleich zulässig ist. Möglicherweise ist das durch unterschiedliche meteorologische Voraussetzungen nicht gegeben.

Wenn eine Evaluierung stattgefunden hat und die Auswirkungen der getroffenen Maßnahmen zu 20 % (Bsp.) mehr Niederschlag führten, dann muss noch die Aussagekraft beurteilt werden. Statistik: Wie viele Zellen müssen untersucht werden damit die natürliche Schwankung berücksichtigt wird?

## 6.6 Steigerung der Effizienz der Hagelabwehr

Ein erster Ansatz die Hagelabwehr in der Steiermark zu beurteilen kann darin bestehen, die Flugzeugeinsätze auf ihre Notwendigkeit hin zu überprüfen. Möglicherweise zeigt ein Seeding-Kriterium, dass an manchen Tagen Einsätze geflogen wurden, obwohl das Seeding-Kriterium nie erfüllt war, oder man stellt fest, dass in manchen Situationen mehr Einsätze wünschenswert gewesen wären. Natürlich ist das im Nachhinein leicht aufzuzeigen, weil man keine Prognosen erstellen muss. Auf diese Weise werden zwar die direkten Effekte des Seeding nicht beurteilt, möglicherweise können aber Kosten eingespart werden. In Tabelle 6.4 wird gezeigt wie man die Flugeinsätze bewerten kann. Die Anzahl der jeweiligen Einsätze kann in die Felder A bis F eingetragen werden. Eine Wolke gilt dann als nicht korrekt behandelt, wenn sie zwar mit AgJ in Kontakt kommt, jedoch in ungenügender Menge oder zu einem Zeitpunkt, an dem das Silberjodid nicht wirken kann. Sollte sich herausstellen, dass die Felder B, C und D einen relativ hohen prozentualen Anteil an der Gesamtanzahl der Einsätze aufweisen, muss das Seeding-Kriterium und die Methode der Durchführung von Seeding-Aktivitäten hinterfragt werden. Diese Art der Untersuchung sollte jedes Jahr nach dem operativen Einsatzzeitraum durchgeführt werden.

Seeding-Kriterium erfüllt	Wolke korrekt behandelt	Wolke nicht korrekt behandelt	Wolke nicht behandelt
Ja	A	B	C
Nein	D	E	F

**Tabelle 6.4:** Bewertung der Seeding-Einsätze

Stellt sich bei der Evaluierung heraus, dass ein bestimmter Wolkentyp, der zu einer bestimmten Zeit und an einem bestimmten Ort behandelt wurde, besonders gut auf die Maßnahmen reagiert, so sollte das im zukünftigen operationellen Betrieb der Hagelabwehrbetreiber berücksichtigt werden. Im Gegenzug kann auf die Behandlung gewisser Wettersysteme verzichtet werden, wenn klar ist, dass kein Erfolg zu erwarten ist.

## Kapitel 7

# Schlussbemerkung

Ziel dieser Diplomarbeit war es verschiedene Möglichkeiten zu finden, um das Hagelabwehr-Programm in der Steiermark evaluieren zu können. Die notwendigen theoretischen Grundkenntnisse für die Entwicklung eines computergestützten Auswerte-Programms wurden gezeigt. In den ersten Kapiteln wurden die Grundlagen der Entstehung von Hagel und die prinzipiellen Möglichkeiten der aktiven Hagelabwehr vorgestellt. Es wurden die bereitstehenden Daten und Messwerte für eine Analyse der konvektiven Wetersituationen erläutert. Anschließend folgte eine umfangreiche Literaturrecherche, um die Methoden der Differenzierung zwischen Regen- und Hagelzellen und die bereits vorhandenen Evaluierungsansätze von anderen Hagelabwehr-Projekten kennenzulernen. Die bekanntesten und vielversprechendsten Methoden wurden gezeigt. Die Anwendbarkeit dieser Werkzeuge an die Gegebenheiten im Einsatzgebiet der Plattform Hagelabwehr Steiermark wurde überprüft und es wurden konkrete Vorschläge für die Entwicklung eines computergestützten Hagelabwehr-Analyseprogramms präsentiert. In wenigen Jahren werden genügend viele Datensätze vorliegen, um statistisch aussagekräftige Ergebnisse liefern zu können. Der operationelle Flugbetrieb der steirischen Hagelabwehr-Betreiber wurde in dieser Arbeit nicht bewertet, nach einer Evaluierung der getroffenen Maßnahmen werden jedoch Steigerungen der Effizienz möglich sein.

Parallel zu der vorliegenden Arbeit wurde, ebenfalls an der TU Graz, von Christoph Sonnberger eine Datenbank erstellt, die die notwendigen Daten und Messwerte für eine Analyse der Hagelabwehr speichert. Das Programm *Hagel.exe* wurde aktualisiert und erweitert. Das Analysemodul dieses Programms kann jederzeit um die in dieser Arbeit vorgeschlagenen Maßnahmen erweitert werden.

Die nächsten Schritte sollten folgendermaßen gesetzt werden:

1. Entwickeln eines Kriteriums zur Differenzierung zwischen Regen- und Hagelzellen
2. Entwickeln einer Software zur Zugbahnbestimmung
3. Analysieren der verschiedenen Parameter

In Punkt zwei sieht der Autor die größte Herausforderung. Nach einer stufenweisen Verfeinerung des Auswerte-Programms werden statistisch aussagekräftige Ergebnisse geliefert werden können.

# Anhang



## Anhang A

# Radiosonden-Messwerte vom 13. 6. 2010

Die Messwerte, die mit einer Radiosonde an einem Wetterballon gewonnen werden, geben Auskunft über einige interessante Parameter wie z.B. die 0-°C-Isotherme und die -20-°C Isotherme. Zwischen diesen beiden Grenzen befindet sich der größte Vorrat an unterkühltem Wasser. In den Bereichen der Atmosphäre in denen die Temperaturen unterhalb der -20-°C-Marke liegen überwiegt bereits der Anteil der Eispartikel. Dem Luftdruck können die jeweiligen Höhen zugewiesen werden und der Taupunkt sowie die relative Luftfeuchtigkeit können abgelesen werden.

Im gezeigten Beispiel weist die Windgeschwindigkeit in der Höhe der Null-Grad-Grenze ein Maximum auf, möglicherweise kann das als Indiz für einen bevorstehenden Hageltag gewertet werden. Eine Untersuchung darüber sollte stattfinden.

## 11240 LOWG Graz-Thalerhof-Flughafen Observations at 03Z 13 Jun 2010

PRES	HGHT	TEMP	DWPT	RELH	MIXR	DRCT	SKNT	THTA	THTE	THTV
hPa	m	C	C	%	g/kg	deg	knot	K	K	K
1000.0	94									
972.0	347	21.2	15.2	69	11.29	0	0	296.8	329.6	298.8
952.0	524	20.2	13.2	64	10.11	48	4	297.5	327.1	299.3
928.0	742	21.2	12.2	56	9.71	107	9	300.7	329.6	302.5
925.0	770	21.0	12.0	56	9.61	115	10	300.8	329.4	302.5
911.0	901	19.8	11.7	60	9.57	110	10	300.8	329.3	302.6
875.0	1246	16.5	10.9	70	9.47	125	16	300.9	329.1	302.7
850.0	1495	14.2	10.4	78	9.40	130	12	301.0	329.0	302.7
845.0	1545	13.8	10.3	79	9.37	125	10	301.1	329.1	302.9
819.0	1808	12.0	9.6	85	9.24	173	8	301.9	329.5	303.6
776.0	2257	10.4	7.0	79	8.13	255	6	304.9	329.6	306.4
765.0	2376	10.0	6.2	78	7.86	235	8	305.6	329.6	307.1
741.0	2642	9.0	4.7	74	7.27	215	16	307.4	329.8	308.8
716.0	2927	8.0	3.0	71	6.68	240	25	309.3	330.1	310.6
700.0	3114	8.0	-2.0	49	4.74	240	35	311.3	326.5	312.2
692.0	3209	7.8	-3.2	46	4.39	236	36	312.1	326.2	312.9
689.0	3244	7.6	-3.8	44	4.20	235	37	312.3	325.8	313.1
678.0	3377	6.8	-6.2	39	3.57	235	38	312.8	324.4	313.5
626.0	4020	0.4	-7.9	54	3.39	235	41	312.8	323.8	313.4
602.0	4335	-2.7	-8.7	63	3.31	234	39	312.6	323.5	313.3
592.0	4468	-3.3	-17.3	33	1.67	234	38	313.4	319.1	313.8
559.0	4919	-5.7	-28.7	14	0.64	232	36	315.8	318.1	315.9
500.0	5780	-12.7	-34.7	14	0.40	230	31	317.5	319.0	317.6
499.0	5795	-12.8	-34.8	14	0.40	230	31	317.5	319.1	317.6
424.0	7014	-21.4	-43.4	12	0.19	260	23	321.7	322.4	321.7
400.0	7450	-24.5	-46.5	11	0.15	255	25	323.1	323.7	323.1
393.0	7576	-25.5	-46.5	12	0.15	255	25	323.4	324.0	323.4
350.0	8406	-32.1	-46.3	23	0.17	275	25	325.3	326.0	325.3
343.0	8550	-33.3	-46.3	26	0.18	267	23	325.6	326.3	325.7
329.0	8840	-35.2	-50.7	19	0.11	250	19	327.0	327.4	327.0
321.0	9010	-36.3	-53.2	16	0.08	240	19	327.7	328.1	327.8
300.0	9480	-39.3	-60.3	9	0.04	240	27	329.9	330.0	329.9

PRES	HGHT	TEMP	DWPT	RELH	MIXR	DRCT	SKNT	THTA	THTE	THTV
hPa	m	C	C	%	g/kg	deg	knot	K	K	K
293.0	9642	-40.5	-64.5	6	0.02	239	28	330.4	330.5	330.4
250.0	10710	-46.9	-68.9	6	0.01	230	31	336.2	336.3	336.2
241.0	10948	-48.6	-69.3	7	0.01	230	33	337.3	337.3	337.3
216.0	11660	-53.5	-70.5	11	0.01	227	31	340.3	340.4	340.3
200.0	12150	-55.9	-71.9	12	0.01	225	29	344.1	344.1	344.1
168.0	13250	-60.7	-75.7	12	0.01	235	33	353.7	353.7	353.7
150.0	13960	-58.9	-81.9	4	0.00	215	29	368.4	368.4	368.4
140.0	14395	-57.3	-89.3	1	0.00	228	26	378.5	378.6	378.5
117.0	15523	-59.5	-90.5	1	0.00	261	16	394.4	394.4	394.4
110.0	15914	-54.7	-86.7	1	0.00	272	13	410.4	410.4	410.4
100.0	16520	-57.3	-89.3	1	0.00	290	8	416.7	416.8	416.7
94.8	16857	-59.1	-90.1	1	0.00	240	10	419.6	419.6	419.6
91.0	17117	-57.8	-89.3	1	0.00	205	14	427.1	427.1	427.1
89.0	17258	-57.1	-88.8	1	0.00	200	14	431.1	431.2	431.2
83.0	17702	-55.0	-87.5	1	0.00	250	8	444.2	444.2	444.2
79.1	18008	-53.5	-86.5	1	0.00	208	10	453.5	453.5	453.5
77.0	18180	-54.1	-86.9	1	0.00	185	12	455.7	455.7	455.7
72.0	18610	-55.6	-87.9	1	0.00	240	12	461.2	461.3	461.2
70.0	18790	-56.3	-88.3	1	0.00	265	10	463.6	463.6	463.6
67.0	19068	-56.4	-88.4	1	0.00	15	6	469.3	469.3	469.3
64.0	19359	-56.5	-88.5	1	0.00	115	12	475.3	475.3	475.3
62.3	19531	-56.5	-88.5	1	0.00	140	12	478.8	478.9	478.8
60.0	19770	-56.4	-88.4	1	0.00	175	14	484.3	484.3	484.3
55.0	20324	-56.0	-88.0	1	0.00	215	8	497.2	497.3	497.2
50.0	20930	-55.7	-87.7	1	0.00	145	4	511.8	511.8	511.8
42.6	21957	-52.7	-85.7	1	0.01	84	8	543.1	543.2	543.1
39.0	22523	-54.4	-86.7	1	0.01	50	10	552.6	552.7	552.6
37.7	22741	-55.1	-87.1	1	0.01	76	11	556.3	556.4	556.3
37.0	22861	-55.0	-87.1	1	0.01	90	12	559.6	559.7	559.6
34.0	23402	-54.3	-86.9	1	0.01	20	12	575.0	575.0	575.0
31.2	23952	-53.7	-86.7	1	0.01	90	12	591.0	591.0	591.0
31.0						95	12			

**Tabelle A.1:** Radiosonden-Messwerte vom 13. 6. 2010, Quelle: University of Wyoming  
<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>, Seite 2/2

Anhang A. Radiosonden-Messwerte vom 13. 6. 2010

Station identifier: LOWG  
 Station number: 11240  
 Observation time: 100613/0300  
 Station latitude: 47.00  
 Station longitude: 15.43  
 Station elevation: 347.0  
 Showalter index: -0.89  
 Lifted index: -0.65  
 LIFT computed using virtual temperature: -1.07  
 SWEAT index: 199.19  
 K index: 27.30  
 Cross totals index: 23.10  
 Vertical totals index: 26.90  
 Totals totals index: 50.00  
 Convective Available Potential Energy: 58.84  
 CAPE using virtual temperature: 92.56  
 Convective Inhibition: -340.83  
 CINS using virtual temperature: -296.02  
 Equilibrium Level: 338.84  
 Equilibrium Level using virtual temperature: 337.36  
 Level of Free Convection: 525.44  
 LFCT using virtual temperature: 545.55  
 Bulk Richardson Number: 0.89  
 Bulk Richardson Number using CAPV: 1.40  
 Temp [K] of the Lifted Condensation Level: 284.51  
 Pres [hPa] of the Lifted Condensation Level: 843.34  
 Mean mixed layer potential temperature: 298.73  
 Mean mixed layer mixing ratio: 10.14  
 1000 hPa to 500 hPa thickness: 5686.00  
 Precipitable water [mm] for entire sounding: 29.38

Parameter	Description	Units
PRES:	Atmospheric Pressure	[hPa]
HGHT:	Geopotential Height	[meter]
TEMP:	Temperature	[celsius]
DWPT:	Dewpoint Temperature	[celsius]
RELH:	Relative Humidity	[%]
MIXR:	Mixing Ratio	[gram/kilogram]
DRCT:	Wind Direction	[degrees true]
SKNT:	Wind Speed	[knot]
THTA:	Potential Temperature	[kelvin]
THTE:	Equivalent Potential Temperature	[kelvin]
THTV:	Virtual Potential Temperature	[kelvin]

## Anhang B

# Zellenzuordnung zu Versicherungsmeldungen vom 13. 6. 2010

Der Österreichischen Hagelversicherung wurden am 13. 6. 2010 in 29 Gemeinden der Steiermark Hagel gemeldet. Anhand von Radardaten wurde überprüft, welche Zellen grundsätzlich als hagelverursachend in Frage kommen. Die Ergebnisse finden sich in Tabelle B.2. Durch die Einbindung von zusätzlichen Informationen, wie z.B. der Auswertung der HTP, kann die Erfolgsquote vermutlich noch gesteigert werden.

Gemeinde	Bezirk	Anzahl Schadensmeldungen (Betriebe)	Mögliche Zellen (Uhrzeit)
Frohnleiten	Graz-Umgebung	2	17:20 18:15 19:00 19:30 20:10
Hitzendorf	Graz-Umgebung	1	18:55 19:25
Röthelstein	Graz-Umgebung	1	18:25
Dechantskirchen	Hartberg	2	20:25 21:10
Dienersdorf	Hartberg	2	1:00
Grafendorf / Hartberg	Hartberg	3	20:20
Greinbach	Hartberg	1	20:15 21:15
Hartberg	Hartberg	3	21:10
Hartberg Umgebung	Hartberg	4	21:10
Kaibing	Hartberg	1	20:50
Lafnitz	Hartberg	13	21:10 21:15
Pinggau	Hartberg	5	21:15
Pöllau	Hartberg	2	20:10 21:00

Anhang B. Zellenzuordnung zu Versicherungsmeldungen vom 13. 6. 2010

Gemeinde	Bezirk	Anzahl Schadensmeldungen (Betriebe)	Mögliche Zellen (Uhrzeit)
Puchegg	Hartberg	2	20:10
Riegersberg	Hartberg	17	20:20 21:00
Saifen-Boden	Hartberg	2	20:00 23:45
St. Lorenzen am Wechsel	Hartberg	10	20:05 20:25 21:05
Schachen bei Vorau	Hartberg	33	20:15
Schönegg bei Pöllau	Hartberg	1	21:00
Vornholz	Hartberg	26	20:10 23:55
Wenigzell	Hartberg	18	20:10 23:55
Baierdorf bei Anger	Weiz	1	19:50 23:40
Gasen	Weiz	1	18:50
Koglhof	Weiz	1	19:15 19:35 19:50
Kulm bei Weiz	Weiz	1	20:45
Miesenbach bei Birkfeld	Weiz	2	19:55 23:55
Naintsch	Weiz	3	19:40 20:20 21:50
Puch bei Weiz	Weiz	1	20:45
St. Kathrein am Offenegg	Weiz	1	18:45 19:30 20:20 21:45

**Tabelle B.1:** Zellenzuordnung zu von Hagel getroffenen Gemeinden vom 13. 6. 2010, Seite 2/2

Zahl der in Frage kommenden hagelverursachenden Zellen	5	4	3	2	1
Zahl der betroffenen Gemeinden	1	1	3	11	13

**Tabelle B.2:** Konvektive Zellen werden von Hagel getroffenen Gemeinden zugeordnet. Teilweise kommen mehrere Zellen in Frage.

## Anhang C

# Verifizierung der Versicherungsmeldungen 2009

Neben den Hageltestplatten dienen vor allem die Schadensmeldungen der Österreichischen Hagelversicherung als Bestätigung für Hagel am Boden. Die Meldungen des Jahres 2009 werden hier auf Plausibilität untersucht. Dies geschieht mit Hilfe von Radarbildern. Sind keine Radarbilder vorhanden, oder soll Hagel aufgetreten sein obwohl auf den Radarbildern keinerlei Niederschlag zu erkennen ist, so können die betroffenen Hageltage nicht in weitere Untersuchungen eingebunden werden.

Im Jahr 2009 wurden an 121 Hageltagen 6961 Schäden in den südlichen und östlichen Bezirken der Steiermark gemeldet. An 43 Tagen liegen gute Radarbilder vor, an 26 Tagen sind die Meldungen zu hinterfragen und an 52 Tagen liegen keine Radardaten vor. Somit bleiben von 121 gemeldeten Hageltagen nur 43 Tage für eine genauere Betrachtung übrig. Ein Auszug der Untersuchung ist in Tabelle C.1 zu sehen. Zusätzlich wurden bereits die Höhen der 0-°C-Isotherme und der -20-°C-Isotherme ermittelt. Diese sind für weitere Untersuchungen von Interesse.

Gemeinde	Bezirk	Anzahl Schadens- meldungen	gemeldetes Schadensdatum	Verifizierung	Höhe: 0 °C	Höhe: -20 °C	Bemerkung
Aibl	Deutschlandsberg	1	2009 04 23	100	2000	5000	?
Kitzeck im Sausal	Leibnitz	1	2009 04 24	100	1500	5000	?
Gundersdorf	Deutschlandsberg	3	2009 04 29	1	2100	5500	ok
Wernersdorf	Deutschlandsberg	1	2009 05 01	10000	kein Radar		
Hitzendorf	Graz-Umgebung	2	2009 05 03	10000	kein Radar		
Stainztal	Deutschlandsberg	1	2009 05 15	10000	kein Radar		
Kitzeck im Sausal	Leibnitz	1	2009 05 17	100	3000	6300	?
Aibl	Deutschlandsberg	1	2009 05 18	1	3500	6500	gut
Graz VII	Graz Stadt	12	2009 05 19	1	3300	6400	gut
Graz VII	Graz Stadt	1	2009 05 20	1	3200	6000	? ok
Glojach	Feldbach	2	2009 05 23	100	3200	6500	?
Edelsbach bei Feldbach	Feldbach	2	2009 05 24	1	3800	6800	ok
Lannach	Deutschlandsberg	1	2009 05 27	1	3300	6500	ok
Garanas	Deutschlandsberg	1	2009 05 28	100	2100	5800	?
Großklein	Leibnitz	1	2009 06 09	10000	kein Radar		
Sulmeck-Greith	Deutschlandsberg	1	2009 06 10	1	3100	6700	
Limberg bei Wies	Deutschlandsberg	1	2009 06 12	100	2500	5900	?
Eichberg-Trautenburg	Leibnitz	1	2009 06 15	100	3800	6900	?
Deutschlandsberg	Deutschlandsberg	1	2009 06 16	1	3800	7000	gut
Riegersberg	Hartberg	1	2009 06 18	100	4000	7000	?
Aibl	Deutschlandsberg	1	2009 06 19	100	4000	7400	?
Oberhaag	Leibnitz	1	2009 06 20	10000	kein Radar		
St. Marein bei Graz	Graz-Umgebung	1	2009 06 30	1	3400	6800	gut
Bairisch Kölldorf	Feldbach	2	2009 07 02	1	3600	7000	gut
Gössendorf	Graz-Umgebung	1	2009 09 14	1	2600	5900	ok
Perlsdorf	Feldbach	1	2009 10 13	10000	kein Radar		
... Summe		6961 Fälle	121 Tage	52 26 43			

**Tabelle C.1:** Verifizierung der Schadensmeldungen der Österreichischen Hagelversicherung 2009 (Auszug).

Verifizierung: 1 ... brauchbare Radardaten vorhanden, 100 ... Radardaten nicht glaubwürdig, 10000 ... keine Radardaten



# Literaturverzeichnis

- Amburn, Steven A. and Wolf, Peter L. (1996), *VIL Density as a Hail Indicator*, Weather and Forecasting Vol. 12, 473-478.
- Aleksić, N. (1988), *Precipitation Effects of Hail Suppression in Serbia*, Theoretical and Applied Climatology Vol. 40, 271-279.
- ASCE - American Society of Civil Engineers (2003), *Standard Practice for the Design and Operation of Hail Suppression Projects*, ISBN 0-7844-0651-0.
- Auer, August H. Jr. (1993), *Hail Recognition through the Combined Use of Radar Reflectivity and Cloud Top Temperatures*, Monthly Weather Revue Vol. 122 (1994), 2218-2221.
- Cotton, W. R. and Pielke, R. A. (1995), *Human impacts on weather and climate*, Cambridge University Press, New York.
- Delobbe, Laurent and Holleman, Iwan (2006), *Uncertainties in radar echo top heights used for hail detection*, Meteorological Applications Vol. 13 Issue 4, 361-374.
- Dessens, Jean (1998), *A Physical Evaluation of a Hail Suppression Project with Silver Iodide Ground Burners in Southwestern France*, Journal of Applied Meteorology Vol. 37, 1588-1599.
- Edwards, Roger and Thompson, Richard L. (1997), *Nationwide Comparisons of Hail Size with WSR-88D Vertically Integrated Liquid Water and Derived Thermodynamic Sounding Data*, Weather and Forecasting Vol. 13, 277-285.
- Emde, Klaus v.d. (1994), *Wolkenphysikalische Aspekte der Hagelbildung und Hagelabwehr*, Publ. BZ Raiffeisenhof Graz, Band 12, 1-7.
- Foote, G. B. (1984), *A Study of Hail Growth Utilizing Observed Storm Conditions*, Journal of Climate and Applied Meteorology Vol. 23, 84-101.
- Hailzl, Gerhard (2004), *Vorlesungsunterlagen Radarmeteorologie*, Universität Wien.
- Haragan, Donald R. (1974), *Precipitation Augmentation - Problems and Progress*, Water Resources Bulletin Vol. 10 Nr. 3, 547-554.

- Holleman, Iwan (2001), *Hail detection using single-polarization radar*, Scientific Report KNMI WR-2001-01.
- Huff, F., Changnon, S., Hsu, C.-F. and Scott, R. (1984), *A Statistical-Meteorological Evaluation of Two Operational Seeding Projects*, Journal of Climate and Applied Meteorology Vol. 24, 452-462.
- Hsu, C.-F. and Changnon, Jr. (1983), *On the Evaluation of Operational Cloud Seeding Projekts*, Water Resources Bulletin Vol. 19 Nr. 4, 563-569.
- Karacostas, T. S. (unbek.), *The Greek National Hail Suppression Project: Design, Physical Hypothesis and Statistical Evaluation*, Department of Meteorology and Climatology, Aristotle University of Thessaloniki.
- Lazar, Reinhold (1994), *Niederschlagsverteilungen bei Hagelereignissen in der Steiermark*, Publ. BZ Raiffeisenhof Graz, Band 12, 47-49.
- Lenning, Eric and Fuelberg, Henry E. (1998), *An Evaluation of WSR-88D Severe Hail Algorithms along the Northeastern Gulf Coast*, American Meteorological Society Vol. 13, 1029-1044.
- Mayer, Stefan (2005), *Neue Entwicklungen bei der Forschung in der steirischen Hagelabwehr anhand von Fallbeispielen*, Diplomarbeit an der Karl-Franzens-Universität Graz.
- NRC - National Research Council (2003), *Critical Issues in Weather Modification Research*, The National Academic Press, Washington DC, ISBN: 0-309-09053-9.
- Pachatz, Gunter C. (2005), *Analyse der Effizienz der Hagelabwehr in de Steiermark anhand von Fallbeispielen*, Dissertation an der Karl-Franzens-Universität Graz.
- Petrocchi, P. J. (1982), *Automatic detection of hail by radar*, Air Force Geophysics Laboratory, Tech. Report 82-0277, 33 pp.
- Randeu, W. L. (2010), *Vorlesungsunterlagen Wetterradartechnik*, Technische Universität Graz.
- Root, B., Yeary, M. and Yu, T.-Y. (2011), *Novel Storm Cell Tracking with Multiple Hypothesis Tracking*, AMS Annual 2011.
- Schiesser, H. H. (1994), *Über die Komplexität eines kontrollierten Hagelabwehrexperiments - Beispiel Großversuch IV*, Publ. BZ Raiffeisenhof Graz, Band 12, 18-32.
- Silverman, Bernard A. (2000), *A Critical Assessment of Glaciogenic Seeding of Convective Clouds for Rainfall Enhancement*, Bulletin of the American Meteorological Society Vol. 82 No. 5 (Mai 2001), 903-923.
- Silverman, Bernard A. (2010), *An evaluation of eleven operational cloud seeding programs in the watersheds of the Sierra Nevada Mountains*, Atmospheric Research 97, 526-539.

- Steinacker, R., Dorninger, M., Wölfelmaier, F. and Krennert, T. (1999), *Automatic Tracking of Convective Cells and Cell Complexes from Lightning and Radar Data*, Meteorology and Atmospheric Physics 72, 101-110.
- Svabik, Otto (2001), *Hagelabwehr in Niederösterreich 1981-2000 und in der Steiermark 1982-2001 mit begleitender Unterstützung der ZAMG*, ZAMG, Steirische Hagelabwehrgenossenschaft.
- Wakonigg, H. und Pilger, H. (2010), *Klimaatlas Steiermark, Kapitel 5: Gewitter und Hagel, Version 2.0*, ZAMG.
- Waldvogel A., Federer B. and Grimm P. (1979), *Criteria for the Detection of Hail Cells*, Journal of applied Meteorology Vol. 18, 1521-1525.
- Warner, J. and Twomey, S. (1956), *The use of Silver Iodide for Seeding Individual Clouds*, Tellus VIII 4, 453-459.
- Wieringer, Jon and Holleman, Iwan (2006), *If cannons cannot fight hail, what else?*, Meteorologische Zeitschrift, 15, issue 3, June 2006.
- Wilson, James W., Crook, Andrew N., Mueller, C., Sun, J. and Dixon, M. (1998), *Nowcasting Thunderstorms: A Status Report*, Bulletin of the American Meteorological Society Vol. 79 No. 10, 2079-2099.
- Witt, A., Eilts, M. D., Stumpf, G. J., Johnson, J. T., Mitchel, E. and Thomas, K. W. (1998), *An Enhanced Hail Detection Algorithm for the WSR-88D*, Weather and Forecasting Vol. 13, 286-303.
- Woodley, William L. and Rosenfeld, Daniel (2003), *The Development and Testing of a New Method to Evaluate the Operational Cloud-Seeding Programs in Texas*, American Meteorological Society 2004, 249-263.

WebCite<sup>1</sup> - [www.webcitation.org](http://www.webcitation.org):

Cotton, W. R. (1997), *Weather Modification by Cloud Seeding - A Status Report 1989-1997*, Colorado State University Department of Atmospheric Science, Fort Collins, CO 80523

<http://rams.atmos.colostate.edu/gkss.html> (5. April 2011)

WebCite: <http://www.webcitation.org/5z7G5348b>

Kessinger, Cathy J. and Edward, Brandes A. (1995), *A Comparison of Hail Detection Algorithms*, National Center for Atmospheric Research.

[http://www.rap.ucar.edu/staff/kessinger/cjk\\_faa1995.html](http://www.rap.ucar.edu/staff/kessinger/cjk_faa1995.html) (1. Juni 2011)

WebCite: <http://www.webcitation.org/5z7EsHamI>

Cell-Tracking Software MHT

<https://github.com/WeatherGod>

WebCite: <http://www.webcitation.org/6093eJaZP>

Internet:

Austro Control

<http://www.austrocontrol.at> (4.7.2011)

Blitzortungssystem

<http://www.aldis.at/> (5.4.2011)

NEXRAD

<http://www.roc.noaa.gov> (4.7.2011)

Radiosonden Messwerte, University of Wyoming

<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> (5.4.2011)

Steirische Hagelabwehrgenossenschaft

<http://hagelabwehr.at/index.html> (5.4.2011)

TORRO - Hagel Korngrößenklassifizierung

[www.torro.org.uk](http://www.torro.org.uk) (24.6.2011)

WIIS - Software

<http://www.weterradar.at/> (4.7.2011)

Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik

<http://www.zamg.ac.at/> (5.4.2011)

---

<sup>1</sup> WebCite ist ein Dienst, der Webseiten auf Wunsch archiviert. Die „Kopie“ bleibt auf unbegrenzte Zeit erhalten. Wird die ursprüngliche Seite geändert oder gelöscht, kann weiterhin auf die zitierten Stellen zugegriffen werden.