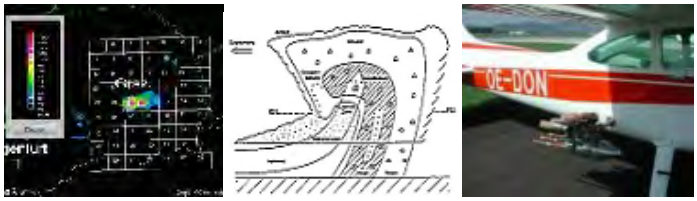
Wegener Zentrum für Klima und Globalen Wandel
Karl-Franzens-Universität Graz



Wissenschaftlicher Bericht Nr. 3-2005

Analyse der Effizienz der Hagelabwehr in der Steiermark anhand von Fallbeispielen

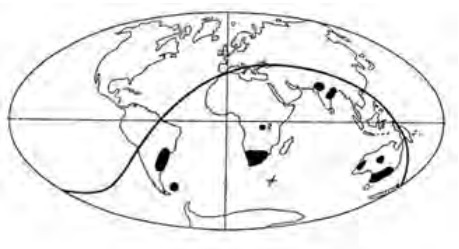
Gunter C. Pachatz

Oktober 2005

Wegener Center
www.wegcenter.at

Das **Wegener Zentrum für Klima und Globalen Wandel** vereint als interdisziplinäres und international orientiertes Forschungszentrum die Kompetenzen der Karl-Franzens-Universität Graz im Forschungsbereich "Klimawandel, Umweltwandel und Globaler Wandel". Forschungsgruppen und ForscherInnen aus Bereichen wie Geo- und Klimaphysik, Meteorologie, Volkswirtschaftslehre, Geographie und Regionalforschung arbeiten in unmittelbarer Campus-Nähe unter einem Dach zusammen. Gleichzeitig werden mit vielen KooperationspartnerInnen am Standort, in Österreich und international enge Verbindungen gepflegt. Das Forschungsinteresse erstreckt sich dabei von der Beobachtung, Analyse, Modellierung und Vorhersage des Klima- und Umweltwandels über die Klimafolgenforschung bis hin zur Analyse der Rolle des Menschen als Mitverursacher, Mitbetroffener und Mitgestalter dieses Wandels. Das Zentrum für rund 30 ForscherInnen wird vom Geophysiker Gottfried Kirchengast geleitet; führender Partner und stellvertretender Leiter ist Volkswirt Karl Steininger. (genauere Informationen unter www.wegcenter.at)

Der vorliegende Bericht wurde im Rahmen einer im September 2005 fertiggestellten Dissertation erarbeitet.



Alfred Wegener (1880-1930), Namensgeber des Wegener Zentrums und Gründungsinhaber des Geophysik-Lehrstuhls der Universität Graz (1924-1930), war bei seinen Arbeiten zur Geophysik, Meteorologie und Klimatologie ein brillianter, interdisziplinär denkender und arbeitender Wissenschaftler, seiner Zeit weit voraus. Die Art seiner bahnbrechenden Forschungen zur Kontinentaldrift ist großes Vorbild — seine Skizze zu Zusammenhängen der Kontinente aus Spuren einer Eiszeit vor etwa 300 Millionen Jahren als Logo-Vorbild ist daher steter Ansporn für ebenso mutige wissenschaftliche Wege:
Wege entstehen, indem wir sie gehen (Leitwort des Wegener Center).

Wegener Center Verlag • Graz, Austria
© 2005 Alle Rechte vorbehalten.
Auszugsweise Verwendung einzelner Bilder, Tabellen oder Textteile bei klarer und korrekter Zitierung dieses Berichts als Quelle für nicht-kommerzielle Zwecke gestattet. Verlagskontakt bei allen weitergehenden Interessen: wegcenter@uni-graz.at.

ISBN 3-9502126-0-4

Oktober 2005

Kontakt: Dr. Gunter C. Pachatz
pachatz@lichtenfels.asn-graz.ac.at

Wegener Zentrum für Klima und Globalen Wandel
Karl-Franzens-Universität Graz
Leechgasse 25
8010 Graz, Austria
www.wegcenter.at

Analyse der Effizienz der Hagelabwehr in der Steiermark anhand von Fallbeispielen

D I S S E R T A T I O N

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Naturwissenschaften

an der Karl-Franzens-Universität Graz

Betreuer:

ao. Univ. Prof. Dr. Reinhold Lazar
(Institut für Geographie und Raumforschung)

Univ. Prof. Dr. Gottfried Kirchengast
(Wegener Zentrum für Klima und Globalen Wandel und Institutsbereich für Geophysik, Astrophysik und Meteorologie / Institut für Physik)

Autor:

Mag. Gunter C. Pachatz

Vorwort

Die Idee zu dieser Arbeit entstand bereits 1994, als ich mein Geographiestudium abschloss und auf werkvertraglicher Basis für die Steirische Hagelabwehrgenossenschaft Verbesserungsvorschläge für das erste Hagelbewertungsprogramm ausarbeitete. Aus beruflichen Gründen musste die Arbeit einige Jahre ruhen, ehe ich - nunmehr in Graz als AHS-Lehrer für Physik und Geographie tätig – mich wieder meiner Doktorarbeit widmen konnte. Das Thema Hagelabwehr hatte bei mir schon aufgrund der fachlichen Anforderungen großes Interesse hervorgerufen, da sowohl physikalische als auch geographische Aspekte und deren Ineinandergreifen zu berücksichtigen waren. Ebenso war für mich die doch große Skepsis vieler Meteorologen und Klimatologen gegenüber dem Thema aktive Hagelabwehr ein zusätzlicher Reiz, mich intensiv mit diesem Thema auseinander zu setzen. Die anfängliche Idee, „Zwillingsfälle“ von (Hagel-)Gewittern mit annähernd gleichen wolkenphysikalischen Bedingungen zu finden, die einmal unbeimpft und einmal beimpft wurden, musste aufgegeben werde, da solche Fälle nicht existierten. Schließlich wurden drei signifikante Gewitterereignisse phänomenologisch untersucht, wobei im Zeitraum 1991 – 2002 alle Hageltage in der südlichen Steiermark überprüft wurden.

Ein großer Dank gilt all jenen, die mich fachlich beraten und unterstützt haben, allen voran meinen beiden Betreuern Reinhold Lazar und Gottfried Kirchengast, Otto Svabik von der ZAMG Wien, Walter Randeu, Konrad Köck und Helmut Paulitsch von der TU Graz, Veronika Kirchweger, Franz Gruber und dem leider schon verstorbenen Hans Gobec von der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft, Josef Harrer (hail air) und Walter Golob (Südflug), stellvertretend für das Team der ZAMG Graz – Thalerhof Albert Sudy und Alexander Podesser, Wolfgang Heimbucher (Donauchem), dem Historiker Erwin Kämmerer, Harald Kessler (Hygieneinstitut Uni Graz), und William Finnegan (Desert Research Institute, Reno, USA) und Jean Dessens (Frankreich) für deren aktuellen Informationen zur Impfsubstanzforschung.

Besonderer Dank gilt meinem privatem Umfeld, meinem Freund und Kollegen Haimo Tentschert für die Hilfe beim Layout, meinen Eltern für die jahrelange Unterstützung und vor allem meiner lieben Frau für ihre Geduld, ihr Verständnis und ihre motivierende Zuversicht.

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit besteht aus einem umfangreichen theoretischen Teil, der neben den geländeklimatologisch - meteorologischen Voraussetzungen für Hagelwetterlagen die wolkenphysikalischen Prozesse hinsichtlich der Hagelbildung und die Hypothesen zur Hagelunterdrückung beinhaltet. Besonders ausführlich werden die unterschiedlichen Impfhypothesen und die Wirkung des Silberjodids diskutiert, wobei diese Frage nach wie vor offen bleiben muss. Es folgt ein umfangreicher Teil zur historischen Entwicklung der Hagelabwehr in der Steiermark und eine Betrachtung der gegenwärtigen Situation. Das anfängliche Ziel dieser Arbeit war es, „Zwillingsfälle“ von ähnlichen Wolken zu finden, wobei die einen beimpft und die anderen unbeimpft sein sollten. Der Untersuchungszeitraum erstreckte sich von 1991 – 2002. Für diesen Zeitraum wurden alle (Hagel-)Gewitterereignisse studiert, wobei sich zeigte, dass keine derartigen Zwillingsfälle existierten. Einerseits steht es der Intention der Hagelabwehr und der Landwirte als deren Auftraggeber entgegen, bestimmte Gebiete absichtlich als Vergleichsgebiete von der Beimpfung auszunehmen, andererseits ist die Unterschiedlichkeit der Gewitterwolkentypen und deren Dynamik zu groß. Schließlich wurden drei Fälle, die sich hinsichtlich Radarhagel, Bodenhagel und Seeding unterschieden und für die am meisten Daten vorhanden waren, eingehend durch Gegenüberstellung von Einfluss- und Wirkungsgrundlagen untersucht und diskutiert. Dabei zeigte sich, dass das vorhandene Wissen um die dynamischen und mikrophysikalischen Prozesse in Gewitterwolken und die technischen Möglichkeiten nicht ausreichen, um die Ausbreitung der Impfsubstanz Silberjodid in den Wolken nachvollziehen zu können. Dazu kommen technische Unzulänglichkeiten. So kann man aufgrund der Radarbilder der hier eingesetzten Wetterradars nicht zweifelsfrei Hagel von Regen unterscheiden. Die Positionsbestimmung der Einsatzflugzeuge und die Aufwindangaben waren nur mit unzureichender Genauigkeit möglich. Hinzu kamen lückenhafte Datensätze bei Radarbildern und Schadhagelmeldungen. Als Ergebnis dieser Arbeit muss festgehalten werden, dass eine phänomenologische Überprüfung der Wirksamkeit der Wolkenbeimpfung mit Silberjodid durch Flugzeuge der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft am konkreten Einzelhagelereignis nicht möglich ist. Die jüngsten Verbesserungen (neues Wetterradar, bessere Generatortechnik) sind ein Schritt in die richtige Richtung. Eine weitere phänomenologische Untersuchung erscheint nur bei besserer Kenntnis der Wolkendynamik sinnvoll, was derzeit (noch) nicht möglich ist. Die Weiterführung der langjährigen statistischen Untersuchung der Bodenhagelsituation ist hingegen stark zu befürworten.

Abstract

The present thesis comprises an extensive section on the theory of hail formation, discussing a. the topographical, climatic and meteorological conditions necessary for the formation of hail, b. the physical processes inside clouds leading to its formation and c. hypotheses concerning the prevention of hail(storms). Particular emphasis has been placed on the discussion of various hypotheses concerning the injection of silver iodide into clouds and on its impact on hail, this latter issue remaining without satisfactory solution for the time being. The subsequent section of this thesis deals with the history of hail prevention in Styria and gives an insight into current forms of hail control in this province. It was the initial aim of this thesis to find comparable clouds (so-called "twin cases"), some of which were to be injected with silver iodide, whereas others were to remain "untreated." The period of data collection extended from 1991 to 2002. During this period every single hailstorm was studied and analyzed, the result being that there didn't exist any such "twin cases". On the one hand, it was and is against the interest of both hail controllers and farmers (who are their clients) to intentionally exempt particular areas of farmland from cloud seeding for scientific purposes; on the other hand, the diversity of thunder-clouds and their dynamics are simply too great. In a further step, three different meteorological scenarios involving radar-detected hail, ground hail and seeding, for which the largest amount of data was available, were closely studied and discussed by comparing and contrasting various methods and their impact. In the course of this study it became apparent that our present knowledge of the dynamic and microphysical processes inside thunder-clouds is not sufficient to fully understand how silver iodide, when injected, spreads inside a cloud. Apart from that, a number of technical shortcomings turned out to be a significant impediment to evaluating important data: due to the images provided by the radar system used, it was impossible to clearly tell hail from rain; it was also impossible to precisely locate planes flying their missions and to gather exact data on up-drafts. In addition, information on damage caused by hail was incomplete. This thesis, therefore, arrives at the conclusion that a phenomenological verification of the impact of silver iodide injected into thunder-clouds by planes of the „Steirische Hagelabwehr-genossenschaft“ in the course of one hailstorm at a time is impossible. Recent technical improvements (a new radar system, more efficient generators) are a promising step in the right direction. Further phenomenological studies only seem practical if our knowledge of cloud dynamics is improved, which isn't feasible at this point. It is strongly advisable, however, to continue the statistical observation of ground hail, a scientific method that has been in use for many years.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung ..... - 1 -
2. Geländeklimatologisch-meteorologische Voraussetzungen für Hagelwetterlagen ..... - 3 -
3. Wolkenphysik und Hagelbildung ..... - 7 -
3.1. Mikrophysikalische Prozesse ..... - 9 -
3.2. Dynamik der Gewitterwolken ..... - 12 -
4. Hypothesen zur Hagelunterdrückung ..... - 19 -
5. Impfhypothesen und Wirkung des Silberjodids (AgJ) in Gewitterwolken ..... - 23 -
5.1. Impfhypothesen ..... - 23 -
5.2. Zusammensetzung und Menge der ausgebrachten Impfsubstanz AgJ ..... - 25 -
5.3. Verteilung des AgJ in der Gewitterwolke ..... - 26 -
5.4. Trefferwahrscheinlichkeit bei Beimpfung mittels Flugzeug ..... - 27 -
5.5. Impfwirkungen und Schadenspotential unterschiedlicher Zelltypen ..... - 28 -
5.6. Wirkung und chemische Eigenschaften von Silberjodid ..... - 29 -
5.7. Umweltmedizinische Aspekte der AgJ-Ausbringung durch die Hagelabwehr . - 31 -
5.8. Neueste Entwicklungen in der Wolkenimpfsubstanzforschung ..... - 34 -
6. Historische Entwicklung der Hagelbekämpfung ..... - 35 -
6.1. Entwicklung von der Antike bis ins frühe 20. Jahrhundert ..... - 35 -
6.2. Moderne aktive Hagelabwehr im 20. und 21. Jahrhundert ..... - 42 -
7. Operations- und Messmethoden der aktiven Hagelabwehr in Geschichte und Gegenwart - 53 -
7.1. Hagelabwehr durch Schall ..... - 53 -
7.2. Hagelabwehr durch den Einsatz von Bodengeneratoren ..... - 54 -
7.3. Hagelabwehr durch den Einsatz von Boden-Luft-Raketen ..... - 55 -
7.3.1. Das kroatische Raketen-Hagelabwehrprogramm ..... - 56 -
7.4. Hagelabwehr durch den Einsatz von Flugzeugen ..... - 57 -
8. Bisherige Arbeiten und aktueller Forschungsstand ..... - 59 -
9. Offene Fragen ..... - 67 -
10. Die aktive Hagelabwehr in der Steiermark ..... - 69 -
10.1. Historischer Rückblick ..... - 69 -
10.2. Die gegenwärtigen Hagelabwehrbetreiber in der Steiermark ..... - 71 -
10.2.1. Die Firma „Südflug“ ..... - 71 -
10.2.2. Die „hail air“ Hagelabwehr Ges.m.b.H. ..... - 72 -
10.2.3. Die Steirische Hagelabwehrgenossenschaft ..... - 73 -

11. Operationelles Vorgehen der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft .....- 77 -
11.1 Technische Ausrüstung.....- 77 -
11.2. Ablauf von Einsätzen.....- 79 -
12. Für die Messung und Datenanalyse wesentliche Aspekte und bisherige Ergebnisse ...- 83 -
12.1. Einflussgrundlagen .....- 83 -
12.1.1. Satellitenbilder .....- 83 -
12.1.2. Wetterlagenberichte .....- 84 -
12.1.3. Wetterradar.....- 85 -
12.1.4. Radiosondenaufstiege.....- 95 -
12.1.5. Seedingreports.....- 96 -
12.2. Wirkungsgrundlagen.....- 97 -
12.2.1. Gewitterreports.....- 97 -
12.2.2. Klimastationen .....- 97 -
12.2.3. Hageltestplatten.....- 98 -
12.2.4. Hagelkarten .....- 107 -
12.2.5. Hagelschadensberichte.....- 108 -
13. Hagelbewertungsprogramme .....- 111 -
14. Vernetzung der Einfluss- und Wirkungsgrundlagen anhand von Fallbeispielen.....- 115 -
14.1. Arbeitsweise .....- 115 -
14.2. Fallstudien.....- 117 -
14.2.1. Fall 1 – 26.06.1991.....- 117 -
14.2.2. Fall 2 – 23.08.1994.....- 130 -
14.2.3. Fall 3 – 03.08.2002.....- 136 -
15. Diskussion der Ergebnisse .....- 143 -
15.1. Fall 1 – 26.06.1991 .....- 143 -
15.2. Fall 2 – 23.08.1994 .....- 147 -
15.3. Fall 3 – 03.08.2002 .....- 148 -
16. Schlussfolgerungen und Ausblick.....- 151 -
17. Quellenverzeichnis.....- 155 -
17.1. Literatur .....- 155 -
17.2. Abbildungen und Tabellen .....- 158 -
Anhang .....- 163 -

1. Einleitung

Zielsetzung dieser Arbeit war es, herauszufinden, ob eine Prüfung der Wirksamkeit der aktiven Hagelabwehr in der Steiermark, im Besonderen jener der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft, hinsichtlich Schadhagelreduzierung möglich ist. Die vorliegende Arbeit setzte sich zum Ziel, neben den praktischen Untersuchungen auch ausführlich wolkendynamische Aspekte zu diskutieren. In den ersten Kapiteln werden daher geländeklimatologisch – meteorologische Voraussetzungen für Hagelwetterlagen sowie mikrophysikalische und wolkendynamische Prozesse in Gewitterwolken diskutiert. Ein eigenes Kapitel ist den verschiedenen Hagelunterdrückungshypothesen gewidmet, da es in diesem Punkt keine einheitliche Linie unter Fachleuten gibt. Die Impfhypothesen (auch diese sind umstritten) und die Wirkung der Impfsubstanz Silberjodid - das ist jene, die von den steirischen Hagelabwehrbetreibern verwendet wird – werden ausführlich abgehandelt. Anschließend folgen einige Kapiteln zur historischen Entwicklung der Hagelabwehr von der Antike bis ins 21. Jahrhundert. Nach der Vorstellung der Operations- und Messmethoden der aktiven Hagelabwehren wird der bisherige Forschungsstand dokumentiert. Der spezielle Teil beschäftigt sich zunächst mit der historischen Entwicklung der Hagelabwehr in der Steiermark und den heutigen Hagelabwehrbetreibern in diesem österreichischen Bundesland. Nach der Dokumentation von Einfluss- und Wirkungsgrundlagen werden bestehende Hagelbewertungsprogramme erläutert. Den Hauptteil bilden drei Fallstudien. Die Gewitterereignisse an diesen Tagen werden eingehend durch Gegenüberstellung der Einflussgrundlagen (Wetterlagenberichte, Wetterradarbilder, Seedingreports) und Wirkungsgrundlagen (Klimastationsdaten, Hageltestplatten, Hagelkarten) untersucht und diskutiert. Die Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen der Falldiskussionen werden gezogen, abschließend wird ein Ausblick auf mögliche künftige Entwicklungen gegeben.

2. Geländeklimatologisch-meteorologische Voraussetzungen für Hagelwetterlagen

Die folgende Betrachtung soll speziell den für die vorliegende Arbeit relevanten Untersuchungsraum, nämlich die südliche Steiermark (historisch Mittelsteiermark) betrachten und Ursachen für die dort häufige Hagelbildung im Zeitraum Mai – September diskutieren.

Im Allgemeinen gelten drei meteorologische Bedingungen für die Bildung von Hagelwolken als Voraussetzung:

1. gradientschwache Wetterlagen (schwacher Hochdruck)
2. Labilisierung durch Zufuhr von kalten, trockenen Luftmassen in großer Höhe (in der Steiermark aus NW)
3. Zufuhr von milden, feuchten Luftmassen (in der Steiermark aus südlichen Richtungen)

Das Alpenvorland im Südosten, besonders der Fußbereich des steirischen Randgebirges entlang der Koralpe, Stubalpe, Packalpe, des Grazer Berglandes, der Fischbacheralpe (also etwa der Linie Eibiswald – Stainz – Graz – Weiz – Hartberg), zählt neben dem Raum Krems-Langenlois in Niederösterreich zu den gewitterreichsten und hagelträchtigsten Gebieten Österreichs. Die Gründe hierfür liegen einerseits in der abgeschirmten Lage gegenüber dem Vordringen von Kaltluft in Bodennähe aus westlich bis nördlichen Richtungen, was ein Vorauseilen der Kaltluft in größerer Höhe und somit eine verstärkte Labilisierung zur Folge hat. Andererseits besteht vor allem im Vergleich mit inneralpinen Tälern ein deutlich größeres Potential an feucht-warmer Luft aus Ungarn und Slowenien. Besonders kritische Situationen den Schadhagel betreffend sind meist an präfrontale Vorderseitenwetterlagen mit nur geringen Druckgegensätzen und einer Höhenströmung aus vorherrschend südwestlicher Richtung gebunden (Lazar, 1994).

Die Zahl der Gewittertage im südöstlichen Alpenvorland (Mittelsteiermark) ist mit der Zahl der Einsatztage der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft etwa vergleichbar. Diese liegen für den Untersuchungszeitraum 1991-2002 bei folgenden Werten:

Jahr	**1991**	**1992**	**1993**	**1994**	**1995**	**1996**	**1997**	**1998**	**1999**	**2000**	**2001**	**2002**
Einsatztage HAG[1]	42	36	36	30	36	31	48	30	34	34	20	30
Einsätze	187	147	125	89	108	101	142	89	84	68	45	73

Tab.2.1: Zahl der Einsatztage mit AgJ und Anzahl der Einsätze mit AgJ im Einsatzgebiet der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft (Quelle: St. Hagelabwehrgenossenschaft)

Aus obiger Tabelle geht hervor, dass die Zahl der Hageltage in den letzten Jahren gesunken ist, die Zahl der Einsätze aber wesentlich stärker gesunken ist. Das heißt, dass seit 1998 auch die Zahl der Gewitterzellen gegenüber den 1980er und 1990er Jahren pro Gewittertag zurückgegangen ist. Auch Otto Svabiks Hageltestplatten-Studie[2] aus dem Jahre 2004 lieferte Ergebnisse, die diesen Trend bestätigten. Die Hageltage im HTP-Gebiet[3] gingen von jährlich 16 (Mittel der Jahre 1982 – 1986) auf 12 (Mittel der Jahre 1997-2001) zurück. In den Jahren 1982 – 1986 wurden bei einem durchschnittlichen Hagelschlag etwa 8-9 HTP-Stationen getroffen, während im Zeitraum 1997 – 2001 nur noch 4 Testplatten getroffen wurden. Das bedeutet, dass auch die räumliche Ausdehnung der Hagelereignisse zurückgegangen ist. Dafür konnte eine Zunahme der Intensität und Heftigkeit der Hagelgewitter seit Mitte der 1990er Jahre beobachtet werden.[4]

Die Gewitterzugbahnen (Schadhagelzüge) sind auch in den letzten Jahrzehnten gegenüber den Aufzeichnungen von D. Staud (1965) weitgehend unverändert (siehe Abb. 2.1). Im Gebiet der Hageltestplattenstationen mit Zentrum Gleisdorf zeigte sich, dass sich gegenüber den 1980er Jahren der Schwerpunkt des Hagelgeschehens in den 1990er Jahren und im 21. Jahrtausend vom Zentrum an den Nordrand des HTP – Netzes verschoben hat, also weiter an den Gebirgsrand verschoben wurde.

Im Untersuchungszeitraum (1991 - 2002) zeigten sich fünf bevorzugte Gewitterregionen und Zugbahnen (siehe auch Kapitel 14):

von der Gleinalpe kommend nach Südost ziehend
über dem Masenberg (nordöstlich von Graz) nach Südwest bzw. Südost ziehend
starke Ausbildung lokaler Zellen im gesamten Einsatzgebiet (auch im Osten relativ weit

[1] HAG = Steirische Hagelabwehrgenossenschaft
[2] Genaueres siehe in Kapitel 12.2.3.
[3] HTP = Hageltestplatte (= engl. „hailpad“)
[4] Genaueres siehe in Kapitel 12.2.3.

entfernt vom Randgebirge)

von der Koralpe kommend in nördliche Richtungen ziehend (v.a. nach Nordost)

vom Raum Kapfenberg kommend über den Hochlantsch ziehend in südliche Richtungen in den Raum Teichalm – Weiz - Gleisdorf

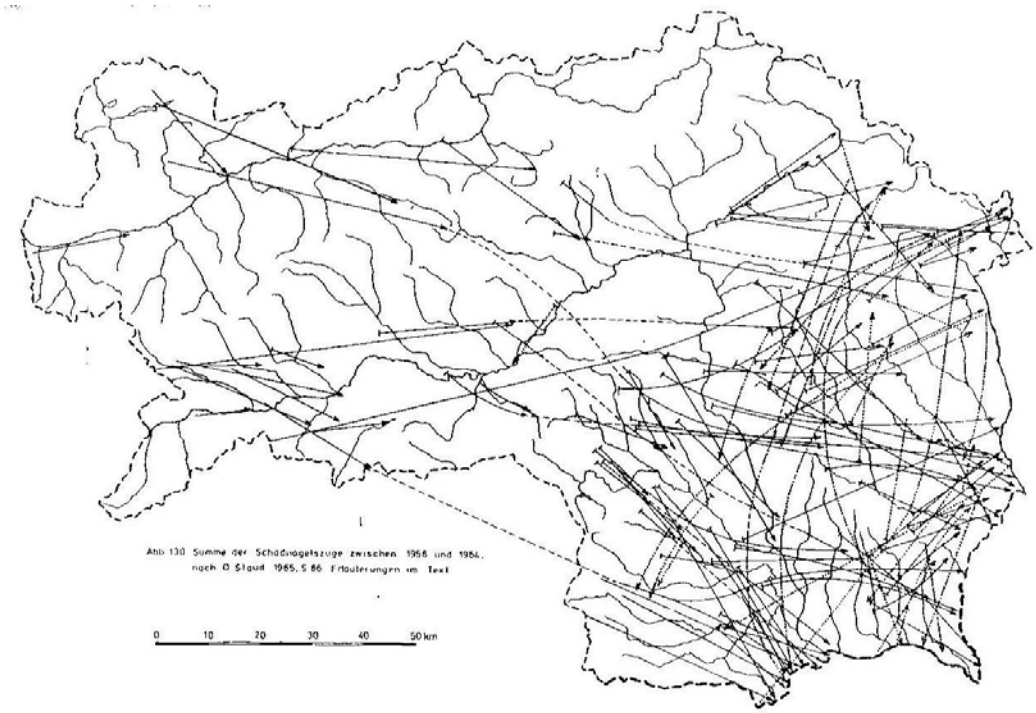


Abb. 2.1: Summe der Schadhagelzüge in der Steiermark zwischen 1958 und 1964 nach D. Staud 1965 (aus: Wakonigg, 1978)

Der zeitliche Ablauf an Hagelgewittertagen ist häufig dadurch gekennzeichnet, dass im Randgebirgsbereich (Koralpe, Gleinalpe, Grazer Bergland) kleinere Zellen entstehen, die schließlich zu einzelnen meist isolierten Gewitterherden heranwachsen, die aber relativ lange im Randgebirge verharren (Lazar, 1994).[5] Die in den Gewitterherden entstandene Kaltluft bricht dann häufig in Bodennähe in das Vorland durch (oft durch das Murtal) und bewirkt eine massive Hebung der dort lagernden feuchtwarmen Luft. In mittleren Höhen hingegen bleibt die südöstliche Strömung erhalten, sodass die Gewitterherde im Randgebirge eine weitere Intensivierung erfahren. Bei südwestlicher Höhenströmung können die Zellen im Gebirgsrandbereich relativ lange stationär bleiben und greifen erst dann meist abgeschwächt auf das Vorland über. Lokale Verstärkungseffekte gerade im Raum Graz sind in dieser Phase

[5] Eine Impfung mit Silberjodid muss spätestens zu diesem Zeitpunkt erfolgen, da im weiteren Verlauf das Risiko einer Wolkenbasisabsenkung stark zunimmt und ein Vorfliegen bis in die Nähe des Böenkragens wesentlich erschwert wird.

trotzdem möglich und gerade in letzter Zeit, wie das starke Gewitter am 26.7.2005 zeigte, besonders heftig.

Auch gradientschwache Wetterlagen führen, wie oben schon erwähnt, häufig zu hagelträchtigen Gewitterherden. Die Niederschlagsverteilungsmuster weisen wegen der geringen Lageänderung nahezu kreis- oder ellipsenförmige Isohyeten[6] auf. Für die Befliegung durch die Hagelabwehr ist zu beachten, dass hier extreme Windscherungen zwischen der ausströmenden turbulenten bodennahen Kaltluft und der darüber angesaugten Luft aus entgegen gesetzter Richtung zu Problemen führen kann. Solche lokal eng begrenzten Zellen können sich im gesamten Untersuchungsraum bilden.

Im Süden des Vorlandes (von Deutschlandsberg bis Radkersburg) kann es auch nach Trogdurchgang – also in Verbindung mit Rückseitenwetterlagen und demnach Zugrichtungen von West nach Ost bzw. Nordwest nach Südost – zu hagelträchtigen Gewittern kommen, wobei die Genese zumeist im Bereich der Koralpe eintritt (Lazar, 1994).

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass gemäß der synoptischen Lage zwei Gewittertypen für das Einsatzgebiet der steirischen Hagelabwehrbetreiber typisch sind: Einerseits können im Vorland immer durch starke Vertikalbewegungen isolierte, stationäre Cb-Entwicklungen[7] entstehen, andererseits sind dynamische Frontgewitter mit Böenwalze an der Stirnseite häufig. Man bezeichnet die stationären Entwicklungen auch als Luftmassengewitter (H.-H. Schiesser, 1988). Die Frontengewitter treten vorwiegend an Kaltfronten (innerhalb der Front oder präfrontal) auf, wobei durch die einfließende Kaltluft eine starke Hebung der lokalen Warmluft erfolgt (Labilisierung). Diese Gewitter können zu allen Tageszeiten vorkommen, besonders häufig sind sie infolge der Konvektion über dem Land während der Nachmittagsstunden. Die stationären Luftmassengewitter dagegen treten in einer einheitlichen Luftmasse auf und werden von einer kräftigen Konvektion in dieser verursacht. Man spricht von „Wärmegewittern“. Durch die starke Sonneneinstrahlung kommt es zur Erwärmung bodennaher Luftschichten und so zur Labilisierung. Die Folge sind neben hohen Temperaturen auch hohe relative Feuchte (Schwüle).

[6] Isohyete = Linie gleicher Niederschlagsmenge

[7] Cb = Cumulonimbus = typische Gewitterwolke mit großer Vertikalerstreckung bis zu 15 km Höhe und vereistem „Amboss“ im oberen Bereich

3. Wolkenphysik und Hagelbildung

Als „Hagel“ bezeichnet man feste Niederschlagsteilchen, die hauptsächlich aus gefrorenem Wasser bestehen mit Durchmessern von ungefähr 5 mm und größer. Kleinere feste Hydrometeore[8] werden als „Graupeln“ bezeichnet.

„Eine Wolke ist eine sichtbare Ansammlung von luftgetragenen Partikeln gleicher oder unterschiedlicher Zusammensetzung und Form“ (K. D. Beheng, U. Wacker, 1993). Diese Definition einer Wolke beinhaltet auch Nebel als eine Art am Boden aufliegende Wolke sowie Wolken aus Aerosolpartikeln[9]. In der meteorologischen Praxis sind die Partikel meist Kondensatprodukte des Wasserdampfes und werden als Hydrometeore (siehe oben) oder Wolkenpartikel im engeren Sinn bezeichnet. Hydrometeore unterscheiden sich durch ihre Form und ihre Dichte, und haben je nach Durchmesser unterschiedliche Fallgeschwindigkeiten:

Art	Durchmesser [mm]	Fallgeschwindigkeit [cm/s]
Wolkentropfen	0,02-0,10	1-25
Sprühregentropfen	0,10-0,50	25-200
Regentropfen	0,50-5,0	200-800
Eisnadeln	1,5	50
Schneesterne	4,2	50
Schneeflocken	10-30	100-200
Graupel	1-5	150-300
Hagel	10-30	> 500

Tab. 3.1: Größe und Fallgeschwindigkeit von Hydrometeoren (aus: H. Malberg, 1997)

Für die Meteorologie im Allgemeinen und die Wetterprognose und Hagelforschung im Speziellen sind dreidimensionale Wolkenmodelle, die die Thermodynamik und die Mikrostruktur von Wolken explizit beschreiben, wesentlich. Diese Modelle erfordern allerdings Ressourcen in der Datenverarbeitung, die heute kaum bereitgestellt werden können. Die steirischen Hagelabwehrbetreiber müssen in Gegenwart und wohl auch in naher Zukunft ohne solche Ressourcen auskommen. Beim Entwurf solcher Wolkenmodelle müssen daher Kompromisse geschlossen werden, wobei einerseits die Mikrophysik explizit berechnet

[8] „Hydrometeor“: a) Flüssige oder feste Partikel in der Atmosphäre, die zumindest teilweise aus Wasser oder Eis besteht; b)Ansammlung solcher Teilchen, die in der Atmosphäre schweben oder durch die Atmosphäre fallen (nach Beheng, Wacker, 1993)

[9] „Aerosol“: Polydisperses Ensembel (besteht aus gleichartigen Teilchen unterschiedlicher Größe) von luftgetragenen festen oder flüssigen Teilchen (Aerosol-Partikel), die hauptsächlich aus einer (oder mehreren) anderen Substanz(en) als Wasser bestehen.

werden kann und dafür die räumliche Dimension des Modells auf zwei oder eine Dimension reduziert wird, andererseits dreidimensional gerechnet wird, dafür die Mikrophysik nur in parametrisierter Form bestimmt wird.[10] Im letzteren Fall verzichtet man auf die Lösung der spektralen Bilanzgleichung (für eine Größenverteilungsfunktion von Hydrometeoren), die als Beispiel hier angeführt werden soll:

$$\frac{\partial f(x)}{\partial t} + \nabla \cdot (f(x)\vec{v}) + \nabla \cdot (f(x)\vec{v}'(x)) + \frac{\partial (f(x)\dot{x})}{\partial x} = \sigma(x) \qquad (3\text{-}1)$$

wobei diese Gleichung die zeitliche Änderung der Verteilungsfunktion *f(x)* an einem festen Ort, die durch den Transport der Teilchen der Masse *x* mit der Schwerpunktsgeschwindigkeit $\vec{v}(x)$ und Diffusionsgeschwindigkeit $\vec{v}'(x)$ sowie das Kondensations- bzw. Depositionswachstum der Partikel mit der Geschwindigkeit $\dot{x}$ verursacht wird. Prozesse wie Koagulation, Aggregation, Bereifen, Schmelzen und Gefrieren sind im Ausdruck $\sigma(x)$ zusammengefasst (M. Laube, 1993). Um einen Eindruck zu vermitteln, wie komplex ein Wolkenmodell ist, sollen die wichtigsten Prozesse, die berücksichtigt werden müssen, hier zumindest erwähnt werden (nach M. Laube, 1993):

- Keimbildung zur Initiierung von Tröpfchen und Eiskristallen
- Kondensation / Verdunstung
- Deposition / Sublimation[11]
- Aggregation[12] von Eispartikeln
- Koagulation[14] von Tropfen
- Sedimentation von (Regen-)Tropfen und Eispartikeln
- Schmelzen von Eispartikeln
- Gefrieren von Tropfen
- Bereifen[13] von Eispartikeln
- Graupel- oder Hagelbildung

Dabei steht der Begriff Eispartikel allgemein für alle Partikelsorten wie Eiskristalle, Schneeflocken, Graupel, Hagel usw.

---

[10] Ein erster Schritt ist das amerikanische TITAN – Programm von M.Dixon, mit dem man erste Erfolge in der Darstellung dreidimensionaler Wolkensysteme und ihrer Dynamik erreicht hat (siehe Kap. 8).

[11] „Deposition“: Allgemein die Ablagerung von atmosphärischen Spurenstoffen an einer Oberfläche. Hier: Phasenübergang von Wasserdampf in Eis. Umgekehrter Prozess: Sublimation

[12] „Aggregation“: Vereinigung von Eispartikeln, meist Eiskristallen durch Verhaken und/oder Anfrieren

[13] „Bereifen“ / „Vergraupeln“: Anfrieren von Tropfen an Eispartikeln

[14] „Koagulation“: Allgemein die Vereinigung von unterschiedlich großen Partikeln. Hier: im engeren Sinn: Kollision und Koaleszens (= Zusammenfließen) von Tropfen; im weiteren Sinn: Kollision und Anhaften beliebiger Hydrometeore. Koagulationsprozesse sind Akkreszenz (= Wachstum großer Partikel wie Regentropfen oder Eispartikel durch Vereinigung mit kleinen Wolkentröpfchen), Autokonversion (= Bildung von Regentropfen durch Zusammenfließen mit Wolkentröpfchen) und Selbsteinfang (= engl. self collection“: Koagulation von Wolkentröpfchen untereinander oder von Regentropfen untereinander)

Soll der Einfluss der Mikrophysik auf die Dynamik eines Gewitters untersucht werden, ist es unerlässlich, alle mikrophysikalischen Prozesse in einem Wolkenmodell zu berücksichtigen (M. Laube, 1993).

3.1. Mikrophysikalische Prozesse

Wolkenluft ist ein Gemenge aus trockener Luft, Wasserdampf, Hydrometeoren und Aerosolpartikeln. Es ist daher ein mehrkomponentiges heterogenes System, da auch das Wasser in drei Aggregatzuständen auftritt (K.D. Beheng, U. Wacker, 1993). Der polydisperse Charakter einer Wolke liegt darin begründet, dass Wolkenpartikel verschieden groß sind, wobei die Radien von Tropfen zwischen 1µm und 5 mm variieren. Tröpfchen mit Radien $\leq$ 50µm werden als Wolkentröpfchen, größere als Regentropfen bezeichnet.

In der Atmosphäre bilden sich Tropfen an so genannten Kondensationskernen. Anzahl und Größenverteilung dieser Kerne sind entscheidend für die gesamte Hagel- und Wolkenentwicklung. Bereits bei relativen Feuchten unter 100% kommt es durch die hygroskopischen Eigenschaften der Kondensationskerne zur Bildung erster Wassertröpfchen, wobei die Geschwindigkeit des Kondensationswachstums stark von der Übersättigung abhängt. Durch Zusammenstoßen und anschließender Vereinigung (Koagulation) kommt es zu verschieden großen Tropfen, wobei durch die unterschiedliche Fallgeschwindigkeit und die Form des Tropfenspektrums die Wachstumsgeschwindigkeit bestimmt wird (K. v. d. Emde, 1994).

Die Mikrophysik der Eispartikel ist gegenüber der der flüssigen Phase wesentlich komplizierter (siehe Abb.3.1). In großen Teilen der Troposphäre liegt die Temperatur unter dem Gefrierpunkt, so dass sich in den Wolken Eiskristalle bilden. Früher nahm man an, dass es analog zu den Kondensationskernen auch Sublimationskerne in der Luft geben würde, auf denen sich der Wasserdampf sofort als Eis absetzt. Heute weiß man, dass zunächst Wassertröpfchen in den Wolken vorhanden sein müssen, die unterhalb von 0°C gefrieren und auf diese Weise Eiskerne (Gefrierkerne) darstellen. Auf ihnen schlägt sich dann der Wasserdampf direkt als Eis nieder, er überspringt die flüssige Phase (H. Malberg, 1997). Dieser Gefriervorgang findet dabei keineswegs schlagartig unter 0°C statt, sondern bei wesentlich niedrigeren Temperaturen, da bei wässriger Lösung der Gefrierpunkt von Wasser gegenüber dem von reinem Wasser herabgesetzt wird. Man spricht von unterkühltem Wasser in der Atmosphäre. Im Allgemeinen lassen sich nach dem Verhältnis von unterkühlten

Wassertropfen zu Eiskristallen vier Temperaturintervalle unterscheiden (nach H. Malberg, 1997):

0°C bis -12°C	unterkühlte Wassertropfen überwiegen
-13°C bis -20°C	Wassertropfen und Eiskristalle sind gleich häufig
-20°C bis -40°C	Eiskristalle überwiegen
unter -40°C	es treten nur noch Eiskristalle auf

Die von den Eiskristallen aufgebauten Formen sind sehr vielfältig und reichen je nach Temperatur von dünnen Plättchen (0 bis -3°C), über hexagonale Plättchen (-8 bis -12°C) bis zu Prismen (-25 bis -50°C). Bei der Auf- und Abwärtsbewegung der Eiskristalle in den Wolken entstehen durch Aufschmelzungsvorgänge und Anfriervorgänge die bizarrsten Formen.

Die komplizierte Mikrophysik der Eispartikel ist durch deren unterschiedliche Formen (Schnee, Graupel, Hagel etc.) bedingt. Man unterscheidet heute drei Arten der Bildung von Eispartikeln (nach K. v. d. Emde, 1994):

1. Deposition: Anlagerung von Wassermolekülen aus der Dampfphase an Eiskerne
2. Gefriernukleation: ein in einem Tropfen befindlicher Eiskern löst das Gefrieren aus
3. Kontaktnukleation: die Vereisung eines unterkühlten Tropfens wird durch den Zusammenstoß zwischen Tropfen und einem Eiskern ausgelöst

Homogenes Gefrieren von Wassertropfen findet, wie oben schon erwähnt, nur unter -40°C statt. Haben sich kleine Eispartikel gebildet, können sie durch Deposition von Wasserdampf an Eiskristallen weiter wachsen. Da der Sättigungsdampfdruck über Eis geringer ist, als über Wasser, können Eispartikel wachsen, während Wassertropfen verdunsten. Dieser so genannte „Bergeron-Findeisen-Effekt“ kann eine schnelle Überführung von Wasser zu Eis bewirken (K. v. d. Emde, 1994). Haben die Eispartikel eine gewisse Größe erreicht, können sie durch Anlagerung von Kristallen und Bereifen (Anfrieren unterkühlter Tropfen), also durch Koagulation zwischen Eispartikel und Wassertropfen, weiter wachsen und zu Hagelkörnern werden. Um bei höherer Temperatur als bei -40°C zu gefrieren, brauchen unterkühlte Tropfen einen so genannten Eisbildungskern, der beispielsweise ein vom Erdboden aufgewirbelter Tonerdepartikel sein kann, der durch seine Oberflächeneigenschaften ab etwa -8°C einen Eiskristall zu bilden vermag (H.-H. Schiesser, 1988). Die aktive Hagelabwehr versucht durch „Impfung“ der Wolken mit Silberjodid und anderen Salzen diese Gefrierkernzahl zu erhöhen

und so viele kleine Hagelkörner statt weniger großer Hagelkörner zu erzeugen. Die Wirkung des Silberjodids wird in Kapitel 4 genauer diskutiert.

Mann kann also generell sagen, dass für die Hagelbildung folgende Voraussetzungen gegeben sein müssen:

- Vorhandensein eines Eisteilchens (Gefrierkerns)
- Gleichzeitiges Vorhandensein von unterkühltem Wasser ($T < 0°C$)

Heute ist die Vorstellung allgemein akzeptiert, dass zur Hagelbildung ein zweistufiger Prozess notwendig ist (siehe auch Abb.3.1):

In der ersten Phase bilden sich in frisch wachsenden Wolkengebieten, häufig in Randbereichen des Gewitterkomplexes (H. Höller, P. F. Meischner, 1993) durch Gefrieren von Regentropfen oder durch Zusammenschließen von Eispartikeln und Wassertropfen Schneeaggregate und Graupelteilchen von einigen mm Durchmesser. Diese Partikeln wirken als Kerne oder „Embryos“ für das weitere Hagelwachstum.

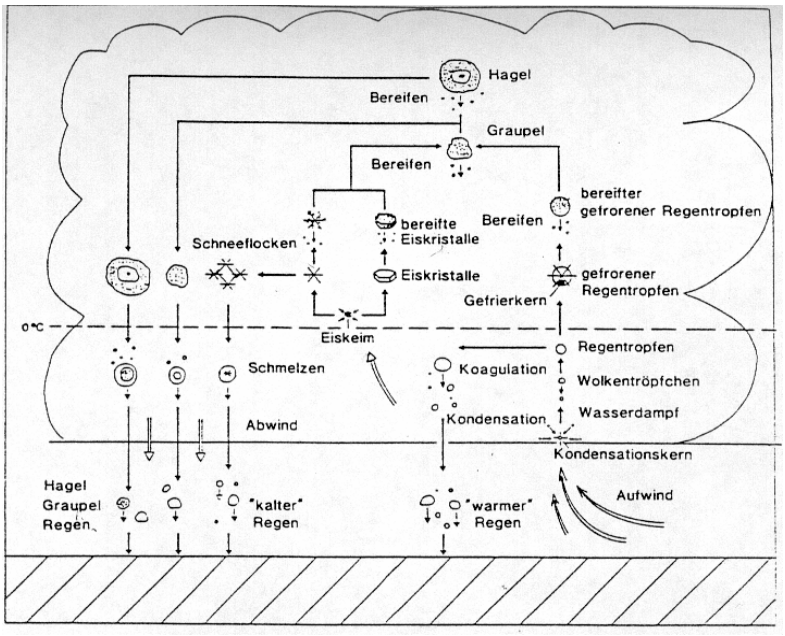


Abb. 3.1: Schematische Abbildung der in Hagelwolken stattfindenden mikrophysikalischen Prozesse (nach H. Höller, P. F. Meischner, 1993)

In der zweiten Phase wachsen diese Embryos durch Kontakt mit genügend unterkühlten Wassertropfen zu Hagelkörnern, wobei diese Tropfen an die Embryos anfrieren. Natürlich sind für diese Prozesse starke dynamische Vorgänge in den Wolken (vertikale Luftbewegungen in Form von Auf- und Abwinden) Voraussetzung.

3.2. Dynamik der Gewitterwolken

Hagelkörner entstehen also in hoch reichenden Gewitterwolken (so genannten „Cumulonimbus“-Wolken oder kurz „Cb“ genannt) durch kräftige Auf- und Abwinde. Die Hagelembryos werden dabei wiederholt zwischen tieferen und höheren Wolkenschichten rasch hin- und herbewegt. In den oberen Bereichen kommt es zum Anwachsen einer Eisschicht, die bei der Abwärtsbewegung der Körner wieder teilweise abschmilzt. So kommt es zum schalenartigen Aufbau einer Hagelschlosse (siehe Abb. 3.2, Abb. 3.3). In den Hauptaufwindgebieten herrschen dabei Geschwindigkeiten von einigen 10 m/s. Die oben diskutierte Zweiteilung des Hagelbildungsprozesses kommt daher, dass die beiden Phasen in unterschiedlichen Bereichen und Stadien einer Gewitterwolke stattfinden und beide Phasen durch unterschiedliche Fallgeschwindigkeiten der Graupelembryos und Hagelkörner gekennzeichnet sind. Damit die Embryos in beiden Phasen genügend Zeit zum Wachstum haben, müssen sich Aufwinde und Fallgeschwindigkeiten die Balance halten (K. v. d. Emde, 1994), es kommt also zu „Schwebevorgängen“, wobei Graupelbildung häufig in den am Gewitterrand befindlichen neuen Zellen statt findet, während Hagel sich im Hauptaufwind bildet (H. Höller, P. F. Meischner, 1993). Innerhalb kurzer Zeit (etwa 10 – 15 Minuten) können so Hagelkörner von mehreren Zentimeter Durchmesser entstehen. Wenn ein solches Hagelkorn für den herrschenden Aufwind, der bis zu 50 m/s betragen kann, zu schwer wird oder aus der Aufwindzone getragen wird, beginnt es zu fallen und wächst bis zur Querung der Nullgradgrenze, die im Sommer in Mitteleuropa bei etwa 3500 – 4000 m Seehöhe liegt, weiter. Sind die Korndurchmesser 1 cm und größer, genügt die Falldistanz von der Nullgradgrenze bis zum Boden nicht mehr, um die Körner zu schmelzen (H.-H. Schiesser, 1988).

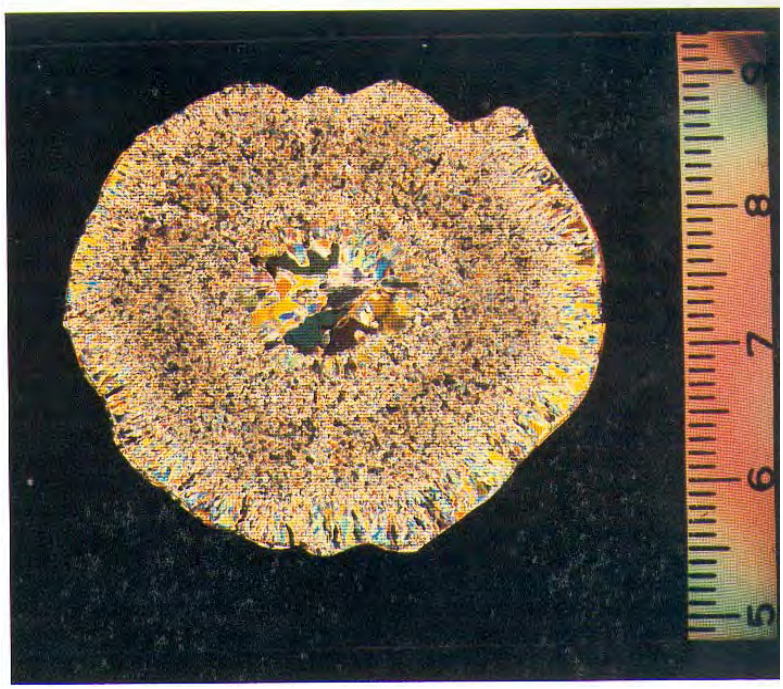


Abb. 3.2: In polarisiertem Licht dargestellter Dünnschliff eines Graupelkorns als Kern mit zahlreichen großen und kleinen Wassertröpfchen, die in stark unterkühltem Zustand einzeln angefroren sind („trockenes Wachstum“), aus: Münchener Rückversicherung, 1984

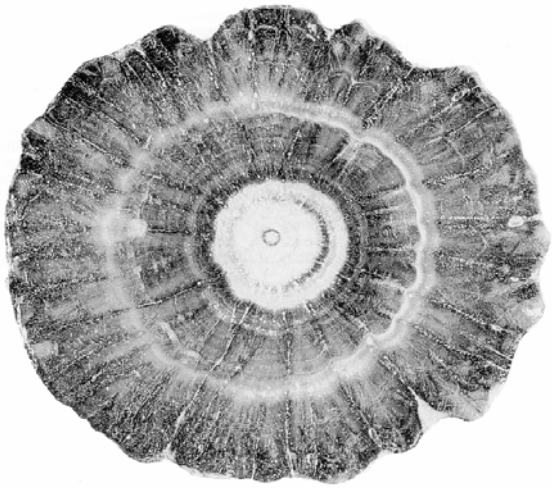


Abb.3.3: In normalem Durchlicht dargestellter Dünnschliff eines Hagelkorns, das sich um ein gut sichtbares Wolkentröpfchen gebildet hat, wobei die zahlreichen Schalen durch Anfrieren eines Wasserfilms entstanden sind („nasses Wachstum“), aus: Münchener Rückversicherung, 1984

Abb.3.4: Das größte in München nachgewiesene Hagelkorn, das im Zuge des Hagelsturmes vom 12.7.1984 zu Boden fiel: 9 cm Durchmesser, 300g;
aus: Münchener Rückversicherung, 1984

Wie oben schon erwähnt, entstehen die Hagelkörner ausschließlich in Gewitterwolken mit großer vertikaler Erstreckung (bis zu 15 km Höhe über Grund), den Cumulonimben (Cb). Laut Münchener Rückversicherung (1984) liegt die Wahrscheinlichkeit für Hagel am Boden nur bei 10% aller Cb-Wolken. Hagel ist letztlich das Ergebnis besonderer mikrophysikalischer (Bildung von Eisteilchen) und dynamischer (konvektive Zellen, starke vertikale Luftbewegungen, Turbulenzen) Bedingungen.

Abb. 3.5: Böenwalze eines Frontgewitters (Quelle: unbekannt)

Abb.3.6: Links: Amboss des Cb des Münchener Hagelsturms vom 12.7.1984,
rechts: Cb über München (beide Fotos aus: Münchener Rückversicherung, 1984)

Diese besonderen Bedingungen für die Entstehung von Hagel führten zu verschiedenen Modellvorstellungen unterschiedlicher Gewittertypen, wobei es je nach Gewittertyp unterschiedliche, mehr oder weniger gesicherte Annahmen über die Embryobildungszone, die von den Hagelkörnern innerhalb der Gewitter eingeschlagenen Bahnen und die Entwicklung des Graupelwachstums in den frühen Stadien gibt (H. Höller, P. F. Meischner, 1993).

Die im Folgenden vorgestellten drei Modellvorstellungen sind jene, die sich aus einer Reihe von physikalischen Untersuchungen als am meisten vernünftig herauskristallisiert haben (nach H. Höller, P. F. Meischner, 1993):

Für Einzelzellengewitter (siehe Abb. 3.7) kann man zwei verschiedene Vorstellungen herausheben Nach der ersten Vorstellung bilden sich die Embryos in einem sich zeitlich verstärkenden Aufwind, wobei bei wachsender Teilchengröße und zunehmendem Aufwind die Teilchen in etwa der gleichen Höhe gehalten werden können. Nach der zweiten Vorstellung findet eine Rückzirkulation der Embryos statt. Diese entstehen zunächst im oberen Wolkenteil durch Bereifen von Eiskristallen oder Gefrieren großer Tropfen. Sie fallen sodann am Wolkenrand in tiefere Schichten und werden anschließend nach innen in den Hauptaufwindkanal getragen, wo sie wieder gehoben werden und zu Hagelkörnern anwachsen. In beiden Fällen beträgt die Wachstumszeit der Körner von etwa 10 – 15 mm Durchmesser ca. 10 – 15 Minuten nach Erscheinen des ersten Radarechos.

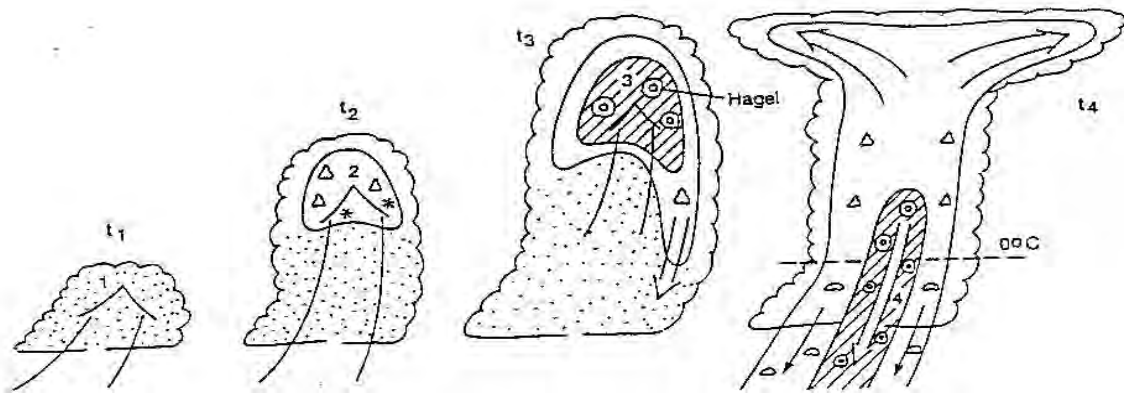


Abb. 3.7: Schematische Darstellung eines Einzelzellengewitters. Dargestellt ist die Entwicklung einer Wolke zu vier aufeinander folgenden Zeitpunkten t_1 *bis* t_4. Graupel entstehen zur Zeit t_2, Hagel zur Zeit t_3 und der Niederschlag fällt zur Zeit t_4 aus der Wolke aus. Die ausgezogenen Linien deuten Reflektivitätskonturen mit nach innen ansteigender Intensität an (siehe auch Kapitel 12.1.3.); aus H. Höller, P. F. Meischner, 1993.

Mehrzellengewitter (siehe Abb. 3.8) bestehen gleichzeitig aus mehreren Konvektionszellen (Gewittertürmen) in unterschiedlichen Entwicklungsstadien, welche einen gemeinsamen Gewitterkomplex bilden. In Ihnen bilden sich in den schwächeren Aufwinden der neu nachwachsenden Zellen Hagelembryos. Bleiben die Teilchen in der neuen Zelle, kann das Hagelwachstum wie bei der Einzelzelle stattfinden. Bei entsprechenden Strömungsverhältnissen können Partikel von den jüngeren Zellen in ältere Zellen transferiert werden und dabei zu Hagel weiterwachsen.

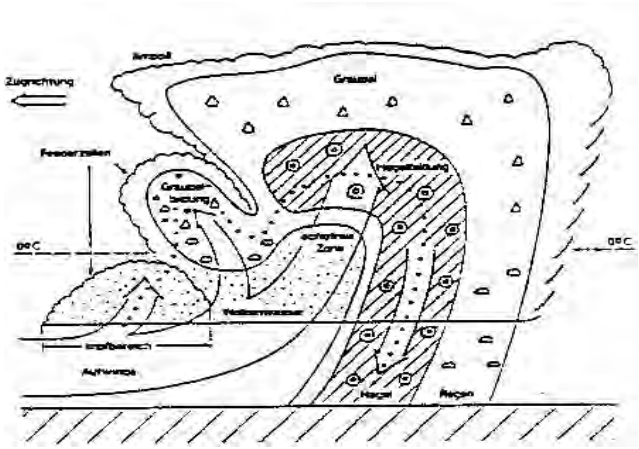


Abb. 3.8: Schematische Darstellung eines Mehrzellengewitters. Mehrere Zellen in verschiedenen Reifestadien sind in einem Komplex zu finden. In den neu wachsenden Zellen links entstehen Graupelteilchen, die dann im Reifestadium der Zelle im Hauptaufwind als Hagelembryos dienen können. Die Haupthagelbildung geschieht oberhalb der echofreien Zone; durchgezogene Linien wie in Abb. 3.7; die Bahn eines an der Hagelbildung beteiligten Eiskeimes (und damit auch die erwünschte Bahn der AgJ-Partikel) während der Entwicklung der Zellen ist durch die punktierte Linie angedeutet; aus: H. Höller, P. F. Meischner, 1993.

In den Superzellengewittern (siehe Abb. 3.9) befindet sich der Hauptaufwind in einem nahezu stationären Zustand ohne die Wachstumsstufen einzelner Zellen zu durchlaufen. Dieser Gewittertyp tritt zwar seltener auf, erzeugt jedoch die größten Hagelkörner (K. v. d. Emde, 1994). Die beiden Wachstumsstufen der Hagelkörner finden bei diesem Typ in verschiedenen Regionen des Gewitters statt: Das Anwachsen zu großen Hagelkörnern findet im Bereich des stärksten Aufwindes statt, wobei zu starke Aufwinde (> 50 m/s) die Hagelbildung verhindern, weil die Verweilzeit der Partikel im Aufwind zu gering ist, um durch Koagulation zu großen Tropfen anzuwachsen und weil in den oberen Bereichen der Wolke kein flüssiges Wasser mehr existiert, welches zu ihrem Größenwachstum beitragen könnte. Das Entstehen der Embryos hingegen findet an den Rändern des Hauptaufwindes bei schwächeren Aufwinden statt. Dort befinden sich viele kleine unterkühlte Tropfen („Embryo-Vorhang"), wo die Embryos die Chance haben, weiter zu wachsen. Während sie in dem Embryo-Vorhang zirkulieren, wachsen sie weiter und fallen dann wieder in den Hauptaufwind. Dabei sammeln sie unterkühlte Tropfen auf und fallen schließlich als Hagel zu Boden (K. v. d. Emde, 1994).

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass in den USA häufig und in der Steiermark allerdings kaum bzw. gar nicht in dieser Ausdehnung anzutreffende Hagelgewittertypen existieren, die in eine so genannte „Squall Line" eingebettet sind. „Squall Lines" sind linienförmige Strukturen von etwa 100 km Länge, die eine über mehrere Stunden stationäre Struktur ausbilden und sich senkrecht zu ihrer räumlichen Erstreckung fortbewegen (H. Höller, P. F. Meischner, 1993)

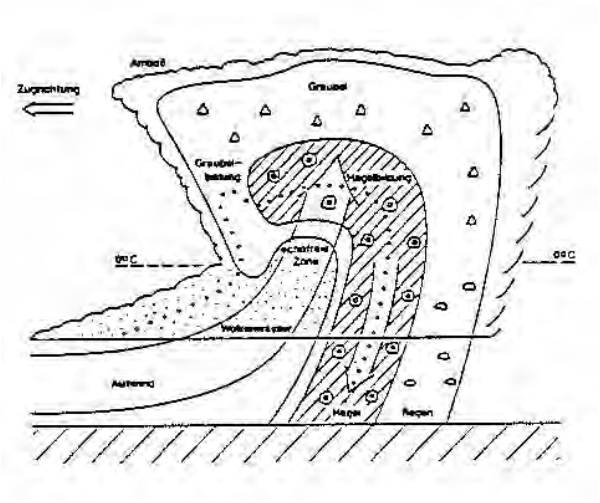


Abb.3.9: Schema eines Superzellengewitters. Die Wolke besteht aus einer großen, quasistationären Zelle. Alle Lebensstadien der durch die punktierte Linie angedeuteten Hagelbildung finden innerhalb dieser Zelle statt; ausgezogenen Linien wie in Abb. 3.7 und 3.8.; aus H. Höller, P. F. Meischner, 1993.

Neben ihrer Struktur unterscheiden sich die oben genannten Gewittertypen auch hinsichtlich der Andauer Hagel bildender Prozesse. In jeder Einzelzelle kommt es nur einmal zur Ausbildung von Hagelteilchen, wobei der Bildungsprozess etwa 10 – 20 Minuten dauert und der Hagelschlag am Boden meist nur wenige Minuten. Multi- und Superzellen sind mit länger andauernden Hagelschlägen von 30 – 60 Minuten verbunden (H. Höller, P. F. Meischner, 1993). Die verstärkte Nutzung der neuen Dopplerradartechnologien und Computersimulationen hat aber auch gezeigt, dass die Trennung zwischen Mehrzellengewitter und Superzelle nicht immer so klar durchgeführt werden kann und es eine Reihe von Mischformen gibt (K. v. d. Emde, 1994).

In den letzten Jahren war in der Steiermark der Trend hin zu mehr Mehrzellengewittern und Superzellengewittern eindeutig zu sehen, wie die Analysen der Wetterradarbilder und die erhöhten Bodenhagelenergiewerte der Hageltestplattenstationen gezeigt haben (siehe auch Kapitel 12.2.3). Im Rahmen der Diskussion der Fallbeispiele (Kapitel 14) wird auf die Art der Gewitter am jeweils untersuchten Ereignistag noch genauer eingegangen.

4. Hypothesen zur Hagelunterdrückung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich in erster Linie mit dem Wirken der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft und deren operativer Einsatztechnik, wobei anhand der Fallbeispiele in Kapitel 14 die Hagelereignisse bewertet bzw. analysiert werden. Die von der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft verwendete Methode zur Hagelunterdrückung ist die Beimpfung der Wolken vom Flugzeug aus mit Silberjodid (chemische Formel: AgJ). Daher wird die Wirksamkeit des AgJ in Kapitel 5 genauer diskutiert. Im Folgenden sei aber in überblicksartiger Form nach H. Höller und P. F. Meischner (1993) auf weitere Hagelunterdrückungskonzepte verwiesen, die nach den denkbaren Wirkungen, die Impfungen hervorrufen könnten, diskutiert werden:

Das Wettbewerbsprinzip verlangt, dass mehr Embryos durch Einbringung künstlicher Eiskeime erzeugt werden und in die Hagelwachstumszone gelangen, als dies natürlicherweise der Fall wäre. Die vorhandene Menge an flüssigem Wasser muss sich dann auf eine größere Zahl von Embryonen verteilen, sodass deren „Wettbewerb“ um das flüssige Wasser die Größe der einzelnen Hagelkörner beschränkt. Dieses Prinzip wurde und wird von den meisten Hagelabwehrversuchen zugrunde gelegt, auch von der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft.

Das Konzept zum vorzeitigen Ausfallen der Hagelembryos legt eine beschleunigte Niederschlagsbildung zugrunde. Auch dies könnte man durch Gefrierkernzufuhr (z.B. AgJ) erreichen, wenn die gebildeten Graupeln in Bereichen mit geringen Aufwindgeschwindigkeiten frühzeitig ausfallen und so nicht mehr in die Zone bevorzugten Hagelwachstums gelangen.

Die Vereisungshypothese besagt, dass alle unterkühlten Tropfen im Hauptaufwind durch die Wirkung künstlicher Eiskeime gefrieren können. Jedes Wolkentröpfchen wird zu einem Eiskristall und kann damit nicht mehr zum Bereifen von Embryos und damit zur Hagelbildung beitragen. Für diese Methode wären enorme Mengen an Impfmaterial notwendig und der aus der Wolke fallende Regen könnte sogar lokal vermindert werden.

Das Konzept der Bahnerniedrigung der Hagelkörner geht davon aus, dass die Embryos in ihrer Bildungsphase schneller wachsen, also eher mit ihrem Wachstum beginnen und so niedrigere Bahnen innerhalb der Wolke einschlagen als dies natürlicherweise der Fall wäre und demnach nicht den höher gelegenen Bereich des optimalen Hagelwachstums erreichen.

In niedrigen Höhen wird das Hagelwachstum durch den niedrigeren Flüssigwassergehalt und die höheren Temperaturen begrenzt.

Das Konzept des beschleunigten Tropfenwachstums im Hauptaufwind geht davon aus, dass die Tropfen durch das Einbringen hygroskopischer (= Wasser anziehender) Teilchen (z.B. NaCl) schneller wachsen und die großen Tropfen als Regen ausfällen. Damit würde das flüssige Wasser in der Hagelwachstumszone vermindert, wofür man allerdings große Mengen des hygroskopischen Materials bräuchte. Die steirische „hail air“ betreibt seit 2003 mit NaCl-Fackeln neben dem herkömmlichen Silberjodid aktive Hagelabwehr.

Das Konzept der künstlichen Beeinflussung der Wolkendynamik basiert auf der Initialisierung von Abwinden, die zu einem Zusammenfallen der Hagelwolken führen sollen oder die vorzeitige Auslösung konvektiver Instabilität (Bildung von Cumuluswolken) durch frühzeitige Entwicklung vieler, kleinerer Wolken. Dieses Konzept ist allerdings sehr theoretischer Natur und es ist noch nicht klar, wie diese Beeinflussung bewerkstelligt werden könnte.

Nach wie vor war und ist für keines dieser Konzepte der wissenschaftliche Nachweis am Beispiel eines konkreten in der Natur stattfindenden Hagelereignisses mit erfolgter Wolkenbeimpfung geglückt. Diese Arbeit hat sich zum Ziel gesetzt, diesen Nachweis zu erbringen bzw. zu zeigen, worum ein Nachweis nicht möglich ist oder aber die Unwirksamkeit der Methoden zu zeigen.

Folgende Gründe sind für die noch fehlenden Nachweise zusammengefasst zu nennen:

- Zu wenige randomisierte Versuche[15] zum Vergleich geimpfter und ungeimpfter Wolken gleichen Typs wurden bisher durchgeführt.
- Zugrunde gelegte Impfhypothesen sind nicht genügend gesichert.
- Wesentliche Voraussetzungen der Impfhypothesen waren oft nicht gegeben (z.B. das Vorkommen von Regentropfen in bestimmten Wolkenbereichen).
- Eine sehr hohe natürliche Variabilität des Hagelprozesses durch die komplizierte Mikrophysik und Dynamik erschweren einen präzise vorhersagbaren Hagelbildungsmechanismus und die Vorhersage einer endgültigen Größe der am Boden auftreffenden Hagelkörner.

[15] „Randomisieren“ bedeutet das zufällige Auswählen beimpfter und unbeimpfter Hagelzellen

Zum letzten Punkt sei Folgendes ergänzt: Die endgültige Größe der Hagelkörner kann nur sehr schwer abgeschätzt werden. Ist das Wettbewerbsprinzip im Embryowachstumsstadium wirksam (Konzept 1), so sind die Körner im geimpften Fall kleiner als im ungeimpften Fall. Durch die etwas geringere Fallgeschwindigkeit könnten sie in größere Höhen gelangen. Die dort herrschenden Temperaturen und Wassergehalte bestimmen dann, ob das weitere Wachstum nass oder trocken vonstatten geht. Von der Art des Wachstums hängt dann wieder die maximal erreichbare Hagelkorngröße ab, da sich flüssiges Wasser vom Hagelkorn ablösen kann. Die Größe wiederum beeinflusst erneut die Fallgeschwindigkeit und somit die Teilchenbahn (H. Höller, P. F. Meischner, 1993). Man sieht also, dass diese vielfältigen Kopplungen von mikrophysikalischen und dynamischen Prozessen die Abschätzung der Impfmaßnahmen sehr schwierig macht. Browning (1977) schreibt sogar, dass ein Impfen von Wolken zur Hagelunterdrückung in manchen Situationen den Niederschlag reduzieren könnte (zitiert bei K. v. d. Emde, 1994). Diese Aussage ist natürlich „Wasser auf die Mühlen“ jener, die die Hagelabwehr ohnehin als „Regenvertreiber“ bezichtigen.

5. Impfhypothesen und Wirkung des Silberjodids (AgJ) in Gewitterwolken

5.1. Impfhypothesen

Basierend auf den in den Kapitel 3 und 4 dargestellten Prinzipien der Hagelentstehung und Hypothesen der Beeinflussung sind einige Impfkonzepte entwickelt worden, die vom Gewittertyp und den dynamischen und mikrophysikalischen Gegebenheiten des Hagelbildungsprozesses abhängen. Ein Einzellengewitter durchläuft die Stadien der Hagelbildung zeitlich hintereinander und ändert sich räumlich kaum, in Mehrzellengewittern findet man die ersten Hagelbildungsstadien in den neuen Zellen vor dem Hauptniederschlagsgebiet und in Superzellen finden alle Hagelbildungsphasen zeitgleich an verschiedenen Orten innerhalb der Zelle statt (H. Höller, P. F. Meischner, 1993).

Die sich ergebenden Impfstrategien unter Annahme der Wettbewerbshypothese (Konzept 1, siehe Kapitel 4) lassen sich für die unterschiedlichen Gewittertypen wie folgt zusammenfassen: Einzellengewitter sollte man im Zentrum impfen, am besten durch kreisförmige Flugbahnen der Hagelflugzeuge unter dem konvektiven Gewitterturm und zwar zu einem möglichst frühen Zeitpunkt der Wolkenentwicklung. Mehrzellengewitter sollten dort geimpft werden, wo neue Zellen wachsen. Superzellen sollten auf ihrer Vorderseite vor dem Hauptniederschlagsgebiet (in Bewegungsrichtung gesehen) geimpft werden. Laut H. Höller, und P. F. Meischner (1993) sollten diese Impfungen bei den letzten beiden Gewittertypen an der rechten Flanke bei schwächeren oder nur mäßig starken Aufwinden erfolgen, um die Graupelanzahl (Zahl der Embryos) zu erhöhen. In jüngster Zeit werden auch von Wissenschaftlern der ZAMG[16] Wien und von der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft Meinungen vertreten, dass man links ziehende Gewitter in Zugrichtung gesehen vorne links statt vorne rechts impfen sollte. Ergänzend sei noch erwähnt, dass es in Mehrzellen und in Superzellen nicht sinnvoll erscheint, den Hauptaufwind zu impfen, denn die dort eingebrachten Gefrierkerne haben wegen der hohen Aufwindgeschwindigkeiten nicht genügend Zeit, um eine Größe zu erreichen, die für einen effektiven Wettbewerb mit den natürlichen Embryos erforderlich ist.

[16] ZAMG (= Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik)

Neben diesen dynamischen Aspekten bestimmen auch mikrophysikalische Begebenheiten, wie oben schon erwähnt, die Impfstrategie. So basierte schon der in den Kapiteln 6.2 und 8 diskutierte „Großversuch IV“ in der Schweiz auf der Hypothese, dass es in der Hagelwolke eine Zone großer unterkühlter Tropfen geben müsse („Akkumulationszone“). Dabei ging man davon aus, dass die großen unterkühlten Tropfen in dieser Zone nach ihrem Gefrieren als Hagelembryos dienen und das restliche Flüssigwasser aufsammeln könnten. Das würde bei schlagartiger Vereisung aller Tropfen in dieser Zone das Entstehen einer großen Anzahl von Hagelembryos bedeuten, die dann um das verbleibende Wolkenwasser konkurrieren, was zu einer Beschränkung der Hagelschlossengröße führen würde. Die Beimpfung mit Silberjodid wäre unter Annahme der Richtigkeit dieser Theorie optimal.

Beim Großversuch IV konnte kein signifikanter Effekt einer Beeinflussung des Hagels durch Beimpfung mit AgJ festgestellt werden. In den 1970er Jahren wurde mit einem gepanzerten Spezialflugzeug „T-28“ stichprobenartig die Existenz dieser Akkumulationszone überprüft, ohne Erfolg. Es zeigte sich bei diesem Test und auch bei einer nachfolgenden größeren Untersuchung in den USA (National Hail Research Experiment, 1972-1974), dass in den angenommen Zonen großer Tropfen tatsächlich keine Regentropfen vorhanden waren, die Akkumulationszone demnach nicht existierte. Das von H. Höller und P. F. Meischner (1993) eingesetzte Dopplerpolarisationsradar untermauerte die Erkenntnis der fehlenden Akkumulationszone[17]. Ebenso zeigte sich, dass die großen Regentropfen also nicht in Zonen hoher Radarreflektivität waren, sondern vielmehr am Rand der Niederschlagsgebiete zu finden waren und dort nicht in hoher Konzentration. Dennoch sei angemerkt, dass viele Aspekte auch nach jüngsten Untersuchungen, wie beispielsweise die Anfangsphase der Embryoentwicklung und deren Wachstumsverlauf nicht direkt messbar sind und demnach nicht restlos geklärt sind. Ebenso ist es nicht möglich, das zugeführte AgJ am Radarschirm zu beobachten und die Impfeffekte auf die Niederschlagsentwicklung können weiterhin nicht von den natürlicherweise ablaufenden Prozessen getrennt werden. Ebenso besteht nach dem Ausbringen der Impfsubstanz über die weitere Ausbreitung keine Kontrolle mehr. In einer älteren Studie von H. Höller und P. F. Meischner (1990, zitiert in Höller, Meischner 1993) gelang es jedoch, allerdings nur in einem einzigen Fall, die Ausbreitung von so genanntem

[17] GALPERIN et al. (1996, zitiert bei Stasenko 2000) konnten zeigen, dass eine konvektive Zelle von 10 km Höhe die Region der unterkühlten Tropfen im oberen Teil der Wolke in der Größe von 1-3 km für eine Dauer von 4-5 Minuten enthält. Dies scheint ein Beweis für die Existenz dieser von Höller / Meischner (1993) negierten und für die AgJ-Impfung nicht unwichtigen Akkumulationszone zu sein.

„Chaff“ (mit dem Radar gut sichtbare, metallbedampfte Kunststofffäden) in einer Gewitterwolke zu verfolgen. Es zeigte sich, dass der Chaff und vermutlich auch das AgJ in die neu wachsenden Zellen am Rande des Gewitters hinein transportiert und verteilt wurden. Damit konnte man indirekt nachweisen, dass das Impfmaterial an jene Stellen gelangen konnte, an denen es gemäß Impfhypothese auch wirksam werden sollte. (H. Höller, P. F. Meischner, 1993). Die Ergebnisse der Studie zeigten allerdings auch keine signifikanten Effekte der Hagelbeeinflussung durch Beimpfung.

5.2. Zusammensetzung und Menge der ausgebrachten Impfsubstanz AgJ

H. Höller und P. F. Meischner haben in ihrer 1993 veröffentlichten Studie auch die Verbreitung des AgJ in den verschiedensten Gewittertypen abgeschätzt. Dabei gingen sie, was die operative Einsatzmethode und die technische Ausstattung der Hagelflugzeuge betrifft, von Annahmen aus, die dem heutigen Stand und auch dem für diese Arbeit relevanten Stand der Technik der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft für den Untersuchungszeitraum (1991 – 2002) weitgehend entspricht.[18] Die in Höller / Meischners Studie angeführten Daten werden daher wegen der guten Vergleichbarkeit mit denen der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft für die folgende Diskussion verwendet:

Von insgesamt zwei Generatoren (Brennern) wird das AgJ durch Verbrennen einer AgJ-NaJ-Acetonlösung als Aerosol ausgebracht, wobei folgende Daten gegeben sind:

Lösungszusammensetzung:	1 l Aceton ≈ 1000 g
	4 Teile AgJ (bei 62,5 g entspricht das 6,25%)
	1 Teil NaJ[19] (als Lösungsmittel)
Durchflussmenge:	5 – 6 l / h
Freigesetzte Menge AgJ:	300 – 400 g / h pro Generator
AgJ-Partikel pro Gramm[20]:	$5{,}4 \times 10^{12}$/g bei –10°C 22×10^{12}/g bei –15°C 40×10^{12}/g bei –21°C

[18] Die für die in H. Höller und P. F. Meischners (1993) durchgeführten Studie verwendete Technik entspricht etwa dem Stand der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft im Jahre 2005. Im Untersuchungszeitraum für diese Arbeit (1991 – 2002) standen AgJ-Brenner zur Verfügung, die bei niedrigerer Temperatur (900°C) und viel größeren Durchflussmengen (etwa 15 Liter / Stunde) eine schlechtere Verbrennung hatten und eine 20000 mal geringere Gefrierkernzahl in die Wolken befördern konnte als heute. Heute erfolgt die Verbrennung bei 1196°C und der Durchfluss beträgt etwa 7 Liter Stunde.

[19] NaJ = Natriumjodid

[20] Waldvogel (1984) ging von 10^{14} Eiskeimen pro Gramm Silberjodid aus.

Das Beimengen von NaJ dient laut Angaben der Firma „Ashland Chemie“, die die Lösung für die Steirische Hagelabwehrgenossenschaft liefert, dazu, die Löslichkeit des sonst schwerlöslichen Silberjodids wesentlich zu verbessern, wobei die Wirkung des AgJ selbst und die Umweltverträglichkeit weiter unten (in Kapitel 5.6) diskutiert wird.

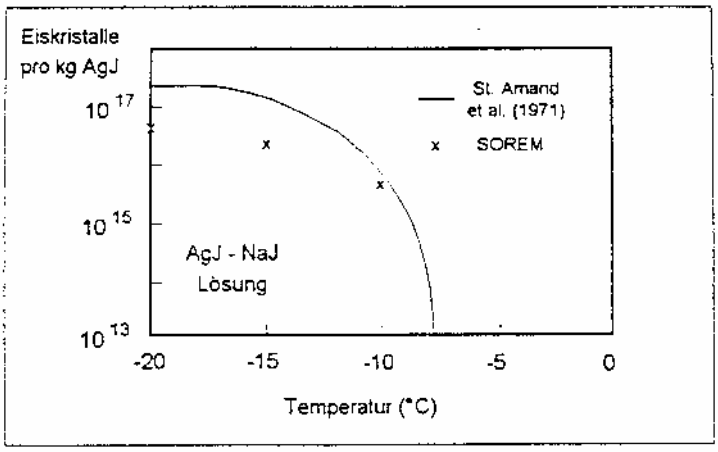


Abb. 5.1: Anzahl der gebildeten Eiskristalle (Gefrierkerne) in Abhängigkeit von der Temperatur für Produkte von AgJ-Generatoren (aus: H. Höller, P. F. Meischner, 1993)

5.3. Verteilung des AgJ in der Gewitterwolke

Nach Freisetzung des AgJ an der Wolkenbasis wird das AgJ in die Wolken gleichsam eingesogen, wobei bei etwa –7°C (siehe auch Kapitel 5.5 und 6.2) die Wirkung von AgJ einsetzt. Das heißt, wenn die Wolkenobergrenze (top) die –7°C-Fläche erreicht hat, wird das AgJ wirksam. Angenommen wird für die AgJ-Verteilung das Modell ein Gauß-Verteilung, wobei zwar Turbulenzen innerhalb der Wolke berücksichtigt wurden, nicht jedoch Vermischungsvorgänge der Wolke mit der Außenluft, durch die das AgJ möglicherweise verloren gehen könnte. Die nachstehende Abbildung 5.2 zeigt die AgJ-Verteilung unter der optimistischen Annahme, dass das gesamte AgJ in der Wolke verbleibt.

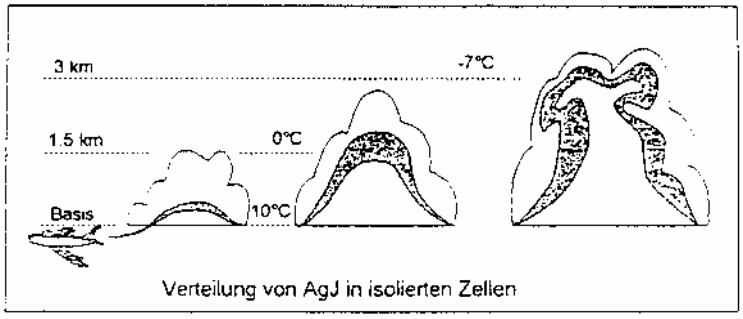


Abb. 5.2: Schematische Darstellung der Verteilung von AgJ in isolierten Zellen (aus: H. Höller, P. F. Meischner, 1993)

Obige Annahme basiert auf einem Vorbeiflug an der Wolkenbasis von 40 s Dauer, wobei die in die Wolke eingebrachte AgJ-Menge 8 g beträgt. Daraus ergibt sich eine maximal als Gefrierkern aktivierbare AgJ-Menge, wobei die AgJ-Dichte aller Teilchen in der Wolke unter Annahme des AgJ-Fahnenvolumens in der Wolke von $8x10^{15}$cm³ etwa 10^{-15} g/cm³ beträgt. Bei –20°C sollte diese Aktivierung erfolgen. Damit ergibt sich eine Eiskeimzahl bei der niedrigsten Aktivierungstemperatur von –7°C von 10^{13} Eiskeimen / kg AgJ oder 10^{10} Eiskeimen / g AgJ. Die daraus berechnete Eiskeimkonzentration liegt für –7°C bei 10^{-2}/l = 10 /m³, für –10°C bei 10 /l = 10^4 /m³ und für –20°C bei 100-1000 /l = 10^5-10^6 /m³. Damit sind bei –20°C durch die AgJ-Impfung etwa 100-mal mehr Eiskeime pro Liter in der Luft als natürlicherweise (H. Höller, P. F. Meischner, 1993).

5.4. Trefferwahrscheinlichkeit bei Beimpfung mittels Flugzeug

Oben wurde die AgJ-Verteilung für den Fall des einmaligen Vorbeiflugs abgeschätzt. In der Praxis werden Wolken wiederholt angeflogen, das Flugzeug wendet und fliegt Schleifen etc. Dabei ist die horizontale Erstreckung des Aufwindes in Abhängigkeit des Wolkentyps von Bedeutung. Die Abschätzungen von H. Höller und P. F. Meischner (1993) ergaben, dass bei Superzellen etwa 50% der einströmenden Luft unbeeinflusst von AgJ seien und damit der Impfeffekt zu gering sei, bei isolierten Zellen das Impfen als ausreichend dargestellt werde und bei Mehrzellengewitter, die von der Struktur und dem zeitlichen Ablauf her zwischen Superzelle und Einzelzelle liegen, 50-100% der zu impfenden Luftmasse mit künstlichen Eiskeimen versorgt würden.

Für die Effizienz der Impfmaßnahmen ist auch die Zeitkomponente ganz wesentlich. Zum einen spielt die Zeit der Entwicklung der Hagelwolke eine Rolle. Im Mittel wird für die Dauer des Bestehens der verschiedenen Zelltypen folgendes angenommen:

- Einzelzellen: 10-15 min
- Multizellen: 20-90 min
- Superzellen: > 30 min

Eine Trefferwahrscheinlichkeit von 70% wird von H. Höller und P. F. Meischner (1993) angenommen.

Ebenso wichtig ist die frühzeitige Erkennung einer potentiellen Hagelwolke, wobei oft durch die rasche Entwicklung keine Zeit für die Einsatzleitung der Hagelabwehr bleibt, auf signifikante Radarechos zu warten. Berücksicht man die Anreisezeit eines Hagelpiloten zum Flugplatz bei Gewitterwarnung mit 30 Minuten, die Zeit bis zum Start mit 15 Minuten, die Flugzeit bis zur Wolke mit 10-15 Minuten und den Flug zu einer neuen Wolke während des Einsatzes, vergehen im Mittel 65 – 70 Minuten. Ist der Pilot an Gewittertagen am Flugplatz bereits anwesend, kann die Zeit vom ersten Erkennen der potentiellen Hagelwolke bis zur Beimpfung der Wolke auf bestenfalls eine halbe Stunde reduziert werden. Die Folgerung von H. Höller und P. F. Meischner ergibt, dass etwa 80% der Gewitter tatsächlich geimpft würden. Dieser Wert lässt sich auch für die Steirische Hagelabwehrgenossenschaft annehmen.

5.5. Impfwirkungen und Schadenspotential unterschiedlicher Zelltypen

Ein zentraler Punkt für die Hagelabwehr ist die Auswirkung der Impfung auf die Korngrößen der Hagelschlossen. Höller und Meischner schätzen diese Korngrößen aufgrund von Modellrechnungen ab und hatten keine tatsächlichen Korngrößendaten, wie sie etwa mit der ausgewerteten HTP-Studie[21] von O. Svabik für die Steiermark vorliegen, zur Verfügung. Damit der erwünschte Impfeffekt der Erhöhung der Eiskeime zum Zwecke der Verringerung der Korngröße der in größerer Menge ausfallenden Hagelteilchen gewährleistet ist, müssen bestimmte Bedingungen erfüllt sein: Erstens müssen genügend zusätzliche Embryos in die

[21] Genaueres siehe Kapitel 12.2.3.

Wolke gebracht werden, um eine merkliche Reduktion des Flüssigwassergehalts zu erreichen und zweitens dürfen die zusätzlichen Kerne nicht zu lange und auf zu hohen Bahnen im Aufwind verweilen, da sie sonst selbst zu großem Hagel anwachsen würden. Dies lässt für H. Höller und P. F. Meischner (1993) den Schluss zu, dass eine Verminderung der Hagelkorngrößen am ehesten in relativ schwachen Hagelgewittern zu erwarten ist, hingegen in Mehr- und Superzellen die Wolkenimpfung durch die dort gegebene kontinuierliche Flüssigkeitszufuhr zu mehr und noch größerem Hagel führen könnte.

Zur Abschätzung des Schadhagelpotentials ziehen die oben genannten Autoren für ihre Studie aus dem Jahre 1993 eine statistische Aufstellung über die Häufigkeit der drei verschiedenen Zellentypen im Untersuchungsgebiet zu Rate und ordnen diesen eine bestimmte Hagelklasse (Korngröße) zu. Diese Art der Abschätzung erscheint dem Autor dieser Arbeit als unzureichend, weil auch keine Wirkungsgrundlagen, wie sie für die vorliegende Arbeit zur Verfügung standen, berücksichtigt wurden. Das Schadenspotential bzw. die tatsächlichen Hagelschäden im Untersuchungsgebiet und –zeitraum für die vorliegende Arbeit werden in Kapitel 12.2.5 und in Kapitel 14 im Rahmen der Diskussion der Fallbeispiele dargestellt. Korngrößenverteilungen und Werte der kinetischen Auftreffenergien werden ebenfalls in Kapitel 14 und in Kapitel 12.2.2 diskutiert.

5.6. Wirkung und chemische Eigenschaften von Silberjodid

Im Jahre 1947 machte der Amerikaner B. Vonnegut eine Entdeckung, die als eigentlicher Beginn der wissenschaftliche Wetterbeeinflussung galt: Er bemerkte in den Forschungslaboratorien der Firma „General Electric“, dass in einer unterkühlten Wolke bestehend aus Wolkentröpfchen mit nur einigen Mikrometern Durchmesser bei Temperaturen zwischen –5°C und –20°C durch Einbringen von AgJ-Kristallen sehr rasch Eiskristalle gebildet werden. An diesen Kristallen lagerten sich weitere Tröpfchen an und nach kurzer Zeit war die Wolke aufgelöst (Waldvogel, 1984). Kurze Zeit später gelangen Forschern derselben amerikanischen Firma erstmals solche Experimente in der freien Atmosphäre. Sie konnten durch Einbringung von künstlichen Gefrierkernen (Silberjodid) gewisse Regionen einer unterkühlten Stratuswolke auflösen. Dabei verfolgte das Flugzeug einen Flugweg, der die Initialen „GE“ beschrieb. Diese Versuche gelten als erste Beweise des Erfolgs dieser „Impfmethode“ in der freien Atmosphäre. Heute ist diese Methode eine Routineoperation um Nebel aufzulösen sowie in der Hagelbekämpfung, mit dem Ziel, möglichst viele Keime in die Wolke zu bringen, um aus sich potentiell entwickelnden wenigen großen Hagelkörnern viele

kleine Hagelkörner zu machen (A. Waldvogel, 1993). Dabei konnte festgestellt werden, dass feinverteiltes Silberjodid schon bei –5,2°C Gefrierkerne bildet. Neben der Einsatzmöglichkeit zur Hagelbekämpfung dachte man bei dieser Methode in erster Linie an das „Regenmachen". Methoden und neuere Entwicklungen zum „Regenmachen" werden später noch kurz vorgestellt.

Bevor hier die chemischen Eigenschaften des Silberjodids diskutiert werden, sei erwähnt, dass in der Vergangenheit auch andere Metallhalogenide wie das Umwelt schädigende Bleijodid (PbJ) als Impfsubstanzen verwendet wurden[22]. Kaliumchlorid (KCl) und Kochsalz (NaCl) werden als hygroskopisch wirkende Salze als Kondensationskerne zur Regenauslösung eingesetzt, NaCl wird heute und verstärkt wohl auch in Zukunft immer häufiger weltweit unter anderem auch von der steirischen „hail air"[23] eingesetzt.

Es existieren mehrere Arten von Silberjodid, wobei nur das AgJ(I)[24] nachweisbar ist. AgJ ist als festes kolloides Einkriställchen bzw. als Aerosol wirksam, wobei es drei Modifikationen gibt:

α-AgJ (kubisch raumzentriert)
β-AgJ (hexagonalesWurtzitgitter)
γ-AgJ (kubisch flächenzentriert)

<u>AgJ-Eigenschaften (aus: Gmelins Handbuch der anorganischen Chemie, 1972):</u>

hellgelbes, mikrokristallines Pulver
MG=234,77; D=6,01g/m³; SP: 558°C; KP: 1506°C [25]
Teilchengrößen (kolloides AgJ-Einkriställchen): 1-500 nm
ab -4,5°C (ab -5,2°C vollständig) wirksam
Affinität zum hexagonalen Schneekristall
bereits in geringen Mengen wirksam (Ausbringung: bis zu 10^{14} Gefrierkeime pro g AgJ)
keine toxische Wirkung von AgJ bzw. Ag^+ und J_2 nachweisbar
AgJ zerfällt unter UV-Lichteinwirkung photochemisch in Silber und Jod (siehe Kapitel 5.7)

---

[22] Diese Substanz wurde hauptsächlich in den Ländern der ehemaligen Sowjetunion in den 1960er und 1970er Jahren zur Hagelbekämpfung verwendet.
[23] Genaueres siehe Kapitel 10.2.2; moderne Impfsubstanzen siehe Kapitel 5.8
[24] Oxidationsstufe I
[25] MG = Molekulargewicht, D = Dichte, SP = Schmelzpunkt, KP = Kochpunkt (Siedepunkt)

Wirkung des AgJ in der Wolke:

AgJ als kolloider Feststoff (Staubaerosol) bzw. Aerosol dient als Gefrierkeim (Eiskeim) zur Kristallisation unterkühlten Wassers, wobei das Ziel ist, dass AgJ als Gefrierkern verteilt die vorhandene Flüssigkeitsmenge auf viele Kerne aufteilen soll, sodass viele Regentropfen statt wenige Hagelkörner ausfallen. Als „Impfstoff" wird von den aktiven Hagelabwehrbetreibern vor allem α-AgJ und (in geringerer Menge) auch γ-AgJ verwendet (Gmelin, 1972). Die genaue Zusammensetzung der AgJ-Lösung der Steirischen Hagelabwehr ließ sich nur soweit eruieren, als in einer Acetonlösung 4 Teile AgJ und 1 Teil NaJ zur Verbesserung des an sich schwer löslichen AgJ beigemengt wurde. Dies ergibt eine etwa 6%ige Aceton-AgJ-Lösung.

Die Keimwirkung des AgJ beruht auf heterogener Eisnukleation, homogene Eisnukleation ist erst unter -40°C möglich (siehe auch oben). Weiters beruht die Eiskeimwirkung auf der Grenzflächenreaktion zwischen AgJ und H_2O, die hexagonale Struktur begünstigt die Keimwirkung (ist allerdings nicht restlos geklärt!). Die auf den AgJ-Teilchen existente Doppelschicht (außen negativ) ist dabei ausschlaggebend, da sie Wasserdipole ausrichtet. Der Wirkungsraum des AgJ in der Wolke ist nach wie vor nicht restlos geklärt (siehe vorige Kapitel).

5.7. Umweltmedizinische Aspekte der AgJ-Ausbringung durch die Hagelabwehr

Der Mensch und sein biologisches Umfeld einerseits und atmosphärische Prozesse andererseits sind eng verknüpft. Daher ist es zu verstärkten Bedenken über die Freisetzung von Chemikalien in die Atmosphäre und deren Wirkung auf Mensch und Umwelt gekommen. Hier soll nun die Wirkung der Impfsubstanz AgJ sowie des Lösungsmittels Aceton auf Umwelt und Mensch nach erfolgter Freisetzung durch die Hagelabwehrflugzeuge diskutiert werden.

Eingangs sei erwähnt, dass AgJ mit einem Löslichkeitsprodukt von $9{,}6 \times 10^{-17}$ zu den schwerlöslichen ionischen Verbindungen zählt, stellt man jedoch die hohe Molmasse und die Größe der von den AgJ-Brennern produzierten Partikel in Rechnung, genügt ungefähr 0,1 µl, um ein solches Teilchen in Lösung zu bringen (Kosmus, 1994).

Die steirische Hagelabwehrgenossenschaft brachte in den Jahren des Untersuchungszeitraumes folgende Mengen an AgJ in die Troposphäre aus:

Jahr	**1991**	**1992**	**1993**	**1994**	**1995**	**1996**	**1997**	**1998**	**1999**	**2000**	**2001**	**2002**
AgJ-Verbrauch in Liter	6894	5139	3398	2704	3329	2719	4917	2557	2355	1926	741	1443
Fackel (100g AgJ/Stück)	173	92	83	51	173	117	152	137	71	100	46	84

Tab. 5.1: AgJ-Verbrauch in Liter und Fackelverbrauch im Zeitraum 1991 – 2002 der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft nach deren Angaben.

Einmal in die Atmosphäre ausgebracht zerfällt das AgJ nach etwa einer halben Stunde unter Einfluss von Sonnenlicht photochemisch in seine Bestandteile Silber und Jod, deren chemische Eigenschaften und Wirkungen im Folgenden aufgelistet werden (nach H. Keßler, 1994):

Silber:

MAK[26]: 0,01 mg/m³ (in Österreich für Silber pro Kubikmeter Luft)

Ag^+ nicht essentiell (lebensnotwendig)

10% Resorption bei oraler Aufnahme

Ablagerung im Gewebe als Sibersulfid; v.a. in Lymphknoten, Milz, Leber, Knochenmark, Lunge, Muskeln und Haut

krankhafte organische Veränderungen werden nicht beobachtet

wirkt antimikrobiell: Mikroorganismen des Wassers reagieren empfindlich

verstärkt Effekte anderer bedenklicher Stoffe

Jod:

MAK: 1 mg/m³

J_2 ist essentiell

orale Aufnahme von 0,15-0,2 mg/d empfehlenswert

Inhalation von Joddampf: Augentränen, Rachenentzündung bis Lungenödem; Absorption durch Haut

Jodallergie möglich, in wässriger Lösung Hautallergie (auch bei Unterschreitung des MAK-Wertes)

[26] MAK = maximale Arbeitsplatzkonzentration; ist ein Maß für die Verträglichkeit der Substanz durch den Menschen

Aceton:

MAK: 500 ml/m³ (seit 1993, vorher: 1000 ml/m³)

farbloses, stark riechendes, feuergefährliches organisches Lösungsmittel

Toxizität gering

bei Inhalation werden 45% resorbiert

Reizmittel auf der Haut, bei Inhalation: Kopfschmerzen, Übelkeit, Erbrechen

Über eventuelle Auswirkungen des von der Hagelabwehr in der Atmosphäre freigesetzten Acetons liegt gegenwärtig keine Untersuchung vor (H. Keßler, 1994). Im Sommer 1992 wurden von H. Keßler fünf Proben Niederschlagswasser nach jeweils fünf erfolgten Hagelabwehreinsätzen über Graz gesammelt. Zwei der untersuchten Proben enthielten 0,2 µg/l Silber, in den anderen konnte kein Silber nachgewiesen werden. Nicht ausgeschlossen werden konnte allerdings, dass die tatsächliche Konzentration von Silber in der Niederschlagsprobe höher gewesen sein könnte, da am Trichter Silberspuren zurückgeblieben sein könnten. Als bemerkenswert erschien, dass die im Planquadrat über dem Messpunkt (Dach des Chemieinstitutes der Universität Graz) ausgebrachte AgJ-Menge während der Ereignisse, wo Silber nachgewiesen wurde, deutlich größer war, als während der übrigen Ereignisse (H. Keßler, 1994).

H. Keßler (1994) schlägt als Konsequenz der Ergebnisse dieser Untersuchung vor, begleitende Studien in Hagelabwehrgebieten durchzuführen, um etwa die Akkumulation von Silber in Blättern oder auch in Jahresringen von Bäumen zu erfassen. H. Keßler (1994) schreibt: *„Die eher schleichenden potentiellen Effekte des Silbers und der auf Silber basierenden Verbindungen, wie etwa die Fähigkeit, Effekte anderer für die Umwelt bedenklicher Stoffe zu verstärken oder die Aktivität von Mikroorganismen des Bodens und des Wassers zu beeinflussen, erfordern eine kontinuierliche Forschung und Überwachung“.*

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass aus gegenwärtiger Sicht die von der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft ausgebrachten Fremdstoffe keine inakzeptablen Risiken mit sich bringen dürften (H. Keßler, 1994).

5.8. Neueste Entwicklungen in der Wolkenimpfsubstanzforschung

Seit dem Jahr 2003 setzt die steirische „hail air“ neben dem Einsatz von Silberjodid auch auf den Einsatz des hygroskopischen Salzes NaCl (siehe auch oben und in Kapitel 10.2.2). Forscher in Frankreich und den USA sind weltweit federführend in der Entwicklung neuer Impfsubstanzen, wobei die NaCl-Technologie für die „hail air“ von J. F. Berthoumieu entwickelt wurde. Eine neue Impfsubstanz ist der Komplex $AgClJ \cdot 0{,}5NaCl$, der sowohl hygroskopische Eigenschaften in den unteren Wolkenschichten haben soll und dort als Kondensationskern wirken und in den oberen Schichten als Eiskeim wirken soll. In den USA gilt W. Finnegan vom Atmospheric Science Center in Reno, Nevada als Pionier der Impfsubstanzforschung. Mittlerweile hat W. Finnegan seine Tätigkeit weitgehend beendet und verweist auf Forschungstätigkeiten an der Colorado State University in Fort Collins, Colorado, USA. In Frankreich beschäftigt sich J. Dessens mit der Impfsubstanzforschung in Zusammenarbeit mit seinen amerikanischen Kollegen. Inzwischen wurde auch eine zweite neue Wolkenimpfsubstanz, die von W. Finnegan vorgeschlagen wurde, von J. Dessens in Frankreich erstmals 2004 erzeugt. Die Substanz setzt sich gemäß „Finnegan-Formel“ wie folgt zusammen: $AgJ + 0{,}547\ NaJ + 0{,}416\ C_6H_4Cl_2$.

Ziel aller neuen Substanzentwicklungen ist die Steigerung der Effizienz der Impfsubstanz hinsichtlich ihrer Regen auslösenden und/oder Hagel unterdrückenden Wirkung in der Wolke.

Die Steirische Hagelabwehrgenossenschaft verwendet bis dato die „klassische“ Aceton-Silberjodid-Lösung (Beschreibung siehe oben), die in den USA bereits seit den 1960er Jahren verwendet wurde und teilweise noch wird. In nächster Zukunft wird es wohl für die Steirische Hagelabwehrgenossenschaft nicht möglich sein, zu modernen Impfsubstanzen zu gelangen, hier empfiehlt sich ein reger Kontakt mit den oben genannten Forschungsstellen und den zugehörigen Herstellungsbetrieben. Eine Zusammenarbeit der drei steirischen Hagelabwehrbetreiber wäre ebenfalls dringend anzuraten.

6. Historische Entwicklung der Hagelbekämpfung

6.1. Entwicklung von der Antike bis ins frühe 20. Jahrhundert

Bereits aus dem Altertum sind Berichte von schweren Unwettern überliefert, die die Bevölkerung in Angst und Schrecken versetzten. Hagelunwetter waren also immer schon eine Geißel der Menschheit und bis heute können deren Folgen wenig beeinflusst werden. Daher ist die Forschung zur Verbesserung der aktiven Hagelabwehr ein wichtiger Beitrag zum Wohle unserer Landwirtschaft, speziell in den Obst- und Weinbaugebieten der Steiermark.

Hagelunwetter sind beeindruckende Naturschauspiele und daher ist es nicht verwunderlich, wenn Naturvölker diese heute noch mit überirdischen Mächten, wie bösen Geistern oder beleidigten Gottheiten in Verbindung bringen. Da die Schäden, die ein Hagelunwetter verursachen kann, für die landwirtschaftlichen Kulturen und für die Menschen, die von diesen Produkten leben, verheerend sein können, finden sich schon in sehr alten Schriften Hinweise über Hagelschäden und deren mögliche Verhütung. Beispielsweise heißt es im Alten Testament: *„Denn ich plage euch mit Dürre, Brandkorn und Hagel in all eurer Arbeit, dennoch kehret ihr euch nicht zu mir, spricht der Herr“ (Haggai 2,17)*. Dementsprechend heißt es in der Allerheiligen-Litanei der römisch-katholischen Kirche u.a. *„propitius esto a fulgure et tempestate“* (W. Müller, 1996). In der Antike setzten sich bereits die Griechen (Plato, Theophrast, Cassianos Bassos) mit der Hagelproblematik auseinander. Plato meinte, Hagel entstehe dann, wenn die „liebende“ Beziehung zwischen den Elementen gestört sei. In seinem Buch „Historia Naturalis“ wies auch der Römer Caius Plinius (4./5.Jhd. n.Chr.) auf Hagelschäden hin. Der römische Schriftsteller R.T.A. Pallidius gab in seinem Buch „De Re Rustica“ sogar höchst interessante Ratschläge, wie man Hagelschäden hintanhalten könne: *„Um Hagel abzuwenden, bedroht man den Himmel mit einer blutigen Axt, die man in den Garten bringt, man nagelt eine Eule mit ausgebreiteten Schwingen an einen Pfahl und bestreicht alle Geräte mit Bärenfett. Manche ziehen es vor, das Bärenfett mit Öl zu mischen, doch man muss darauf achten, dass dies niemand beobachtet, weil das Mittel sonst seine Kraft gegen Hagel, Kälte und andere Bedrohungen der Bäume verliert. Die Haut eines Krokodils, Seehundes oder einer Löwin, im Tor aufgespannt, vertreibt den Hagel ebenfalls. Auch eine in der rechten Hand um das Feld getragene Schildkröte ist wirksam, doch ist es wichtig, sie aufrecht zu halten und auf dem gleichen Weg zurückzukehren, den man gekommen ist. So kann man alles vom Himmel kommende Unheil abwenden. Andere halten, wenn sie eine dunkle Wolke kommen sehen, dieser ihr Spiegelbild vor, womit ihr gefährlicher*

Inhalt entfernt wird. Ein in den Garten gelegter Pferdeschädel wendet allen Schaden ab.“ In seinem Werk „Naturales Questionales“ berichtet Seneca (4-65 n.Chr.), dass im Gebiet von Cleonae öffentliche Hagelwachen aufgestellt wurden. Sobald diese eine Hagelgefahr vermuteten, bereiteten die Bauern Opfer vor, um den göttlichen Groll zu mildern. Die Empfehlungen des oben zitierten Palladius wurden in der Zeit der Scholastik vom Dominikanermönch Albertus Magnus (1193-1280) aufgegriffen, von diesem jedoch bereits als Aberglaube bezeichnet. Einige Jahre vorher vertrat eine andere Persönlichkeit der Scholastik, die Benediktinernonne Hildegard von Bingen (1098-1176) die Ansicht, dass auf farnbewachsenen Feldern kein Hagel niedergehe. In der Abad-Literatur des arabischen Kulturkreises schlug Ibn Koteiba (828-889) vor, dass Talismane gegen Hagel und Winde an astrologisch günstigen Tagen in den Weinbergen ausgelegt werden sollten. Solche seien beispielsweise hölzerne oder marmorne Platten, auf die Trauben gezeichnet werden. Weitere Empfehlungen lauteten, dass man Vipernfleisch auf brennenden Kohlen rösten solle und der entstehende Rauch die Wolken vertreibe. Gruppen von schreienden und klatschenden Männern sollten Bällchen aus Baumwolle gen Himmel werfen oder gesunde, kräftige Personen mit Hilfe von Spiegeln Licht auf die Wolken reflektieren. Talismane als Hilfsmittel gegen Hagel waren auch im mittelalterlichen Europa in Verwendung. So hieß es in der Enzyklopädie des Vincent von Beauvais (1264), dass Gemmen[27], die in Bäume gehängt werden, die Früchte vor Hagel schützen (R. Szith, 1976).

Nicht nur bei den Arabern, sondern auch in Europa war man im Mittelalter, in manchen Gebieten bis in die heutige Zeit davon überzeugt, dass durch Lärmentwicklung Gewitterwolken vertrieben werden könnten. Darauf ist beispielsweise der Brauch des „Wetterläutens“ zurückzuführen, auf das unten genauer eingegangen wird. Almhirten versuchten durch Geschrei, Kuhglockengeläute oder durch eine andere Lärmentwicklung heraufziehende Gewitter zu verjagen (R. Szith, 1976).

Auch mit allerlei Aberglauben war im Mittelalter das Auftreten von Hagel verbunden. Häufig schien in Hexenprozessen das Hagelmachen als Untat der Hexen auf. Die folgenden Auszüge aus dem „Tractatus judiciarius“ des Radkersburger Stadtrichters Johannes Wendteisen aus dem Jahr 1699 stellen einige der fünfzig Fragen dar, die mutmaßliche Hexen während der Folter im Zuge eines Hexenprozesses zu beantworten hatten (aus R. Szith, 1976):

[27] Gemme: geschnittener Stein, meist Edelstein mit tief eingeschnittenem Bild

„17. Auf was Sye (bei der Hexenfahrt auf den Schöckel) *aufgesessen, ob sie hinten oder vorn angeflogen seye...*

27. Waß sye dan für leüth, weliche sie recht erkhent hat, bey solicher Teüfflischer zusamben-khunnft gesehen, wie sie geheussen...

30. Was sodan aus dißer Kochery ervolget, ob si Reuff, seng in den Weingärthrn, auch schauer groß oder khlein gemacht, und alwo es schaden gethan..

33. Nachdeme sie genueg gegessen, Thruncken und Tanzt haben, wohin sye sodan geflogen, auf was sye aufgesössen, un dwo sie sich niedergelassen haben.

34. Ob damallen ihn zuruckhfliegen schauer oder anders wödter nachgangen und was für schaden beschehen seye.

50. ...oder vülleicht hat sie (die Hexe) *die h:spezies* (die Hostie) *zum Wötter oder schauer-machen verkocht oder sonsten darmit im schmeer zum fliegen zuegericht...“*

Um all diesen Unwettern wirkungsvoll zu begegnen, suchte man auch Schutz in Gebeten und Andachten. Man errichtete Wetterkreuze (siehe Abb. 6.1.) und Wetterkapellen.

Abb.6.1.: Wetterkreuze am Saukogel / Sommeralm (Grazer Bergland, Steiermark, aufgenommen am 14.07.2005)

Die Anbetung in Wallfahrtskirchen diente auch dazu, die „Wettergötter“ zu besänftigen. Auf Felder steckte man geweihte Palmwedeln und veranstaltete Prozessionen. Mitunter wurden dabei Reliquien mitgetragen und in Stoßgebeten Patrone und „Wetterheilige“ angerufen, damit sie die Früchte schützen. Manche dieser religiösen Bräuche haben sich bis in die

heutige Zeit erhalten (R. Szith, 1976). Alt sind auch die Bräuche des „Wetterläutens“ und „Wetterschießens“[28]. Wenn es aber trotz des Wetterläutens zu Unwettern kam, wurde der zuständige Mann häufig mit Schmähungen überhäuft. So berichtet ein 65 Jahre alter Schulmeister aus Semriach in der Steiermark im Jahr 1752 im Rahmen einer Eingabe sein Leid:

„…damit (der Schulmeister) *auch das Leithen im Thurn, so in 4 Gloggen Besteht, und in der Capeln 2 kleine glögl, fleissig zum Wötterleithen verrichten kan; dan wan ein mall die arbeith in felt vorhandten, kombt niemants zuhilff. Was aber das ybelste alda ist, vermainen die gottloßen und Meristen hartnäckhige Pauern, ein Schuellmaister solle alle wötter erwöhren khönen, und wan dan zu zeiten ein schaden geschicht und nur etwan die helffte durch schauer Verderbt wird, geben sie schon vor, es seye alles in grundt Erschlagen, könnten nicht Stüfften* (Abgaben reichen)*, geben dem Schullmaister kheine Samblung, sonder tasten ihn mit gröbigsten Schmachwörthern an und throhen ihm gar die schlögg.“*

In der Steiermark war schon um das Jahr 1600 das Böllerschießen gegen Gewitterwolken allgemein üblich. Neben alten Mörsern wurden auch Gewehre und in späterer Zeit sogar Pistolen verwendet.. 1749 berichtet die Herrschaft Greisenegg bei Voitsberg, dass während eines Gewitters bis zu tausend Schuss abgegeben worden seien. Zur selben Zeit berichtet der Verwalter der Herrschaft Deutschlandsberg, Felix Constant von Hormayr, dass die Tiroler und Schweizer, die den Brauch des Wetterschießens nicht kannten, die Steirer verspotteten, *„als ob ihr Land mit Gott einen Krieg führen wolle“*. Später fand dieser Brauch aber auch dort Eingang. Um dem Einhalt zu gebieten, verbot Kaiserin Maria Theresia im Jahre 1750 das Wetterschießen, ohne dass dieses Verbot freilich irgendeine Wirkung gezeigt hätte (R. Szith, 1976). Auszüge aus dem Schriftstück der Kaiserin lauten folgendermaßen: *„…der mit dem häuffigen Wetter-Schiessen / fast im gantzen Land / in Schwung gehende Missbrauch / …womit das Gewölck / wie es die Erfahrenheit giebet / nur mehr irritieret / und endlich dem Nachbarn mit noch grösserem Gewalt auf den Hals getrieben wird / welches sich sonsten etwo wieder verzogen hätte / oder doch wenigstens nicht mit solcher Heftigkeit ausgebrochen / allenfalls aber nur wenigen / und jenem zur Last gefallen wäre / den sonsten das Schicksal und Unglück getroffen hätte / wenn man der Natur seinen freyen und ungezwungenen Lauf gelassen hätte.“* Aus diesem Text ist zu entnehmen, dass die Kaiserin das Wetterschießen weniger aus Gründen des Aberglaubens, sondern viel mehr aus dem

[28] Genaueres unten

Grund, dass man durch diese Methode womöglich noch mehr Schäden anrichten könne, verbieten hat lassen.

Wie schon oben erwähnt, hat sich die Bevölkerung überhaupt nicht an dieses Verbot gehalten und so verbot einige Jahre später Kaiser Joseph II. abermals das Wetterschießen wie auch das Wetterläuten. Der Besitz von Wetterböllern und Pulver wurde unter strenge Strafe gestellt. Dennoch wurde mit dem Wetterschießen bald wieder begonnen, da man damals darin eine der wenigen Möglichkeiten sah, gegen Hagelunwetter vorzugehen (R. Szith, 1976). Die Idee, mittels Schallentwicklung das „Böse“ zu bekämpfen, stammte ja wie oben bereits erwähnt aus der Antike. Da man diesem „Bösen“ das „Gute“ – also Gott - entgegenstellen wollte, wurden zunächst die Kirchenglocken zum Wetterläuten verwendet und erst als man der Meinung war, die Schallausbreitung sei räumlich zu begrenzt, wurden zusätzlich Wettertürme gebaut. Da aber auch dieses Glockengeläute nicht flächendeckend war, wurde auf das Böllerschießen – eben das in alpinen Gegenden vor allem im 19. Jahrhundert übliche „Wetterschießen“ – übergegangen. Wie unten stehende Abbildung 6.2 zeigt, sind viele Wettertürme in der Steiermark noch heute gut erhalten. Zwei Wettertürme zeugen im Freilichtmuseum Stübing von ihrer einstigen Funktion: Einer ist jener Wetterturm, der dem heute erst neu renovierten Turm aus Schaftalberg nachgebaut ist. Am Originalturm in Schaftalberg wurde auch eine Tafel mit den chronologischen Ereignissen, die Geschichte des Wetterturmes betreffend, angebracht. Das Alter des Turmes ist zwar nicht exakt bekannt, wohl weiß man aber, dass 1791 dem Gesuch der Schaftalberger um Erlaubnis zum Wetterläuten stattgegeben wurde. Dass oben schon erwähnte 1783 von Joseph II. ausgesprochene Wetterläutverbot war nämlich 1790 von Kaiser Leopold II. für einige Weinbaugemeinden wieder aufgehoben worden (E. Kämmerer, 1986). Der Turm hat eine schlanke, dem mittel- und nordeuropäischen Bereich zuzuschreibende Holzkonstruktion. Der zweite im Freilichtmuseum befindliche Turm, der Glockenturm aus Schallendorf im Burgenland, weist mit seiner Ständerbauweise mit Eichenholzkonstruktion und zeltartigem Strohdach die für den pannonischen Raum typische Architektur auf. In der Steiermark sind heute noch um den Schöckel einige aus Ziegeln gemauerte (z.B. in Rinnegg und Niederschöckel, siehe Abb. 6.2) und einige aus Holzkonstruktionen bestehende Wettertürme (z.B. Schaftalberg, siehe Abb. 6.2) erhalten. Ebenso findet man Wettertürme in der Südoststeiermark, bis nach Ungarn und Siebenbürgen (E. Kämmerer, 1986) und nach Norden bis Friesland und Holland.

In dieser Zeit der Errichtung von Wetterkreuzen und Wettertürmen rief man nicht nur die „Wettergötter“ an und hoffte so durch die Schallerzeugung auf spirituellem Wege auf die Unwetterverhinderung, sondern entwickelte auch konkrete Ideen, auf naturwissenschaftlich-physikalischem Wege den Schall zur Hagelbekämpfung zu nutzen, worauf ich später noch eingehen werde. Vielfach wurde auch die Meinung vertreten, dass auf Donner der Hagel nachlassen müsse. In Wahrheit lässt sich diese Meinung, als ein Körnchen Wahrheit enthaltend, belegen: Wenn es blitzt und folglich stark donnert, ist das Zentrum des Unwetters nahe. Da dieses eine bestimmte Lebensgeschichte und –dauer aufweist, muss nach dem Überschreiten des Höhepunktes, also der stärksten Donner, bei Weiterziehen der Gewitterzelle, der ja zumeist nur ein bis zwanzig Minuten fallende Hagel aufhören .... Es besteht gewiss nahezu eine Gleichzeitigkeit von Blitz und folgendem Donner, jedoch kein Kausalkonnex in dem Sinne, dass es wegen des Donnergeräusches zu hageln aufhöre. „Noch Aufgeklärtere“ versuchten gar einen anderen logisch erscheinenden Kausalkonnex zu knüpfen: Durch Schall – sekundär, ob durch Donner, Kirchenglocken oder Geschütze – entstehen Wellen, die das Hageleis zersprengen. Diese Idee der mechanischen Wirkung im Hagelkorn wird in der Fachwelt als „Kavitation“[29] bezeichnet und bis in die Jetztzeit verfolgt (W. Müller, 1996). Im Jahre 1902 berief schließlich J. M. Pernter, der Direktor der damaligen „K.K.Central-Anstalt für Meteorologie und Erdmagnetismus“, der heutigen ZAMG[30], eine „internationale Experten - Conferenz für Wetterschießen“ nach Graz ein.

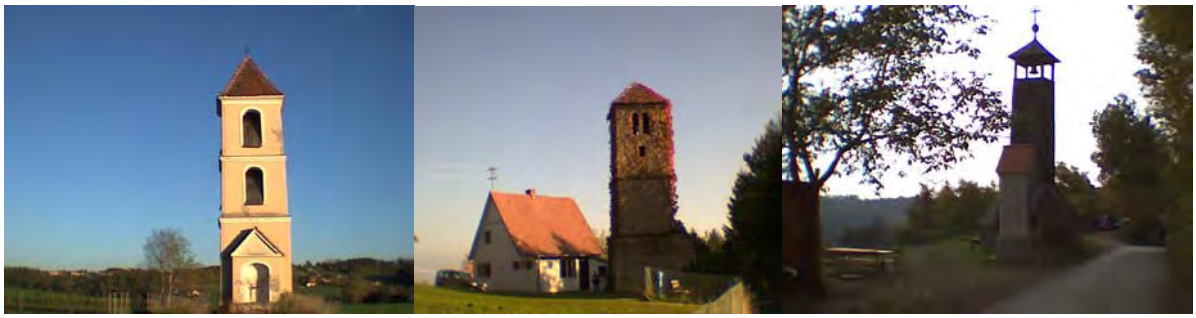


Abb. 6.2.: Wettertürme (aufgenommen im Sommer 2003), von links nach rechts: Niederschöckel, Rinegg, Schaftalberg

[29] siehe auch Kapitel 7.1

[30] Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik

Abb. 6.3.: Links: Bölleranlagen, rechts: Kavitationsanlage (aus: Pernter, 1902)

In dieser Konferenz sollte die physikalische Wirksamkeit des Wetterschießens diskutiert werden. Dabei wurden Versuchanordnungen getestet, den Schalldruck von Kanonendonner mit aufgespanntem Zeitungspapier zu messen. Von insgesamt fünfzig Experten hielten acht „das Wetterschießen für wirksam“, neun „die Wirksamkeit zwar noch zweifelhaft, aber doch wahrscheinlich“, dreizehn „die Wirksamkeit einfach für zweifelhaft“, fünfzehn (darunter J. M. Pernter und der große Grazer Experimentalphysiker Leopold Pfaundler) „die Wirksamkeit für noch zweifelhaft, aber auch für unwahrscheinlich“ und fünf „das Wetterschießen für unwirksam“ (J. M. Pernter, 1902). Bereits im 15. Jahrhundert behauptete Leonardo da Vinci, dass das Gebiet um Vicenca durch Böllerschießen von erhöhten Standpunkten aus vom Hagel bewahrt werden könnte. Eine Mitteilung aus der Meteorologischen Zeitschrift von 1897 weist ebenfalls auf die Sinnhaftigkeit des Hagelschießens hin. So konnten südlich des Bacherngebirges im Raum Windisch-Feistritz (Slowenien) ausgedehnte Weinkulturen dieser Art vom Hagel bewahrt werden. In Norditalien bildete sich um 1900 eine wissenschaftlich untermauerte Hochblüte des Hagelschießens. So ist zum Beispiel in der Meteorologischen Zeitschrift von 1900 nachzulesen, dass ein gewisser Professor Bombicci – der zwei Jahre später allerdings nicht Teilnehmer der oben erwähnten Experten-Konferenz in Graz war – die These vertrat, dass warme Luftströme oder Lufterschütterungen die Hagelbildung insofern stören könnten, als sie die unterkühlten Tröpfchen am Zusammenfließen hindern. Dem wird später entgegengehalten, dass der Donner dann der ärgste Feind des Hagels sein müsse. Auf die Wirkung von Schallwellen vertrauend, versuchte bis in die 1970er und 1980er Jahre Vittori in Norditalien, eine Hagelabwehr mit reinen Explosivraketen aufzubauen, um Hagelkörner durch die Kavitation (Sprengwirkung) zerstören zu können. Dabei wurden Raketen mit je 800 Gramm Cheddit-Sprengstoff in ca. 2000 m Höhe zur Explosion gebracht. Dass solche Experimente heute noch durchgeführt werden, ist jedoch

nicht dokumentiert.[31] Heute weiß man, dass die Kavitation die Hagelkörner nicht beschädigt. Versuche zeigten, dass Hagelkörner, die um eine Explosionsstelle gruppiert wurden, eine Explosion von zwei Kilogramm TNT in einem Abstand von weniger als zwei Metern ohne Beschädigung überstanden. Auch wenn man bedenkt, dass in einer mächtigen Gewitterwolke Energien umgesetzt werden, die der Hälfte einer Megatonnenbombe entsprechen, so erscheint wohl die Explosion einer solch kleinen Sprengstoffrakete als aussichtslos (R. Szith, 1976).

6.2. Moderne aktive Hagelabwehr im 20. und 21. Jahrhundert

Das 20. Jahrhundert war jenes, in dem es bislang die meisten Fortschritte in naturwissenschaftlich-technischer Hinsicht die aktive Hagelabwehr betreffend gegeben hat. Man erkannte, dass man durch Einbringen von „Gefrierkernen“ in unterkühlte Wolkentropfen die Bildung von Eisteilchen erreicht. Solche Vereisungsexperimente zur Verringerung der Teilchenzahl (nicht der Wassermenge!) können im Labor in einer Wolkenkammer jederzeit demonstriert werden.[32] Besonders wichtig war aber die Entdeckung von Vonnegut im Jahre 1947[33]: Forscher der amerikanischen Firma „General Electric“ gelangen erstmals solche Experimente in der freien Atmosphäre. Sie konnten durch Einbringung von künstlichen Gefrierkernen (Silberjodid) gewisse Regionen einer unterkühlten Stratuswolke auflösen. Dabei verfolgte das Flugzeug einen Flugweg, der die Initialen „GE“ beschrieb. Diese Versuche gelten als erste Beweise des Erfolgs dieser „Impfmethode“ in der freien Atmosphäre. Heute ist diese Methode eine Routineoperation um Nebel aufzulösen sowie in der Hagelbekämpfung, mit dem Ziel, möglichst viele Keime in die Wolke zu bringen, um aus sich potentiell entwickelnden wenigen großen Hagelkörner viele kleine Hagelkörner zu machen (A. Waldvogel, 1993). Dabei konnte festgestellt werden, dass fein verteiltes Silberjodid schon bei –5,2°C Gefrierkerne bildet. Neben der Einsatzmöglichkeit zur Hagelbekämpfung, dachte man bei dieser Methode in erster Linie an das „Regenmachen“. Methoden und neuere Entwicklungen zum „Regenmachen“ werden später noch kurz vorgestellt.

Diese Entdeckung von Vonnegut zog eine rasche Entwicklung der aktiven Hagelabwehr zunächst in Amerika und auch in Europa nach sich. Mitte des 20. Jahrhunderts konnte man

[31] siehe auch Kapitel 7.1

[32] Genaueres zur Wirkung von Gefrierkernen in Kapitel 5

[33] siehe auch oben

allerdings noch kaum über die Wirkungsweise der Wolkenimpfungen Auskunft geben bzw. fehlten die Daten, um auf eine effektive Schadhagelverhütung verweisen zu können. Daher hat sich in Europa um das Jahr 1960 zunächst in Italien die Methode einer „passiven Hagelabwehr“ mit Hilfe von Kunststoffnetzen, die über die Obst- und Weinkulturen gespannt werden, entwickelt. Aufgrund der Tatsache, dass es bisher noch nicht zufrieden stellend gelungen ist, die Effizienz der aktiven Hagelabwehr hinsichtlich Schadhagelverhütung zu beweisen, sind diese Netze heute sinnvoller Weise bei vielen Obst- und Weinkulturen in Hagelgebieten weltweit im Einsatz. Auf die detaillierte Diskussion der Methode der passiven Hagelabwehr wird im Rahmen dieser Arbeit verzichtet, die sich diese Arbeit im Speziellen an Hand von Fallbeispielen mit der Methode der aktiven Hagelabwehr der „Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft“ beschäftigt und deren Effizienz untersucht.

Eine dritte Säule neben der aktiven und passiven Hagelabwehr zur Eindämmung von Verlusten der Obstbauern durch hagelbedingte Ernteschäden war die Etablierung von Hagelversicherungsanstalten. Ende des 18. Jahrhunderts entstanden in Europa die ersten Versicherungsanstalten gegen Hagelschäden. Im Jahre 1835 wurde beispielsweise den oberösterreichischen Bauern gestattet, der in Bayern bestehenden Hagelversicherungsanstalt beizutreten. Gegen Ende des 19. Jahrhunderts nahmen verschiedene Versicherungen in der österreichisch-ungarischen Monarchie die Hagelversicherung als Nebensparte auf. Die heutige „Österreichische Hagelversicherungsanstalt auf Gegenseitigkeit“ wurde im Jahre 1946 ins Leben gerufen. Auch heute sind in Österreich praktisch alle Landwirte in hagelgefährdeten Gegenden gegen Schadhagel versichert.[34]

Bedeutsame Entwicklungen zur aktiven Hagelabwehr fanden durch die Durchführung der so genannten „Großversuche“ in der Schweiz statt. Die Großversuche I bis III illustrierten dabei die Entwicklung der Wettermodifikation bezüglich Impftechnologie, Testgröße, Auswertung und Konzept. (A. Waldvogel, 1993). Der Großversuch I fand in der Südschweiz (Tessin) in den Jahren 1948-1952 statt und sollte die Wirkung der Kavitation überprüfen. Sprengstoffraketen mit fünfzig Gramm TNT und einer Flughöhe von zwei Kilometern wurden eingesetzt. Der Vergleich mit einem anderen Gebiet, in dem keine Raketen abgeschossen wurden, ergab keine Unterschiede hinsichtlich Schadhagel. Die Großversuche II (1953-56) und III (1957-63), die ebenfalls im Tessin stattfanden, verwendeten bereits die

[34] Die wenigen verfügbaren Daten zu Schadhagel folgen im Rahmen der Diskussion der Fallbeispiele in Kapitel 14.

Methode der Gefrierkernausbringung (Silberjodid) durch Bodengeneratoren, die später auch in der Steiermark eingesetzt wurden.[35] Beim Großversuch II ergaben sich trotz Einsatz von zwanzig Bodengeneratoren, die Silberjodidrauch ausbrachten, auch keine Unterschiede in der Schadhagelhäufigkeit zwischen dem geschützten Gebiet und einem ungeschützten Vergleichsgebiet. Der Versuch wurde 1956 abgebrochen, da die Forscher erklärten, einen solchen Versuch nicht wissenschaftlich auswerten zu können. Daher wurde beim Großversuch III die Idee von zwei Gebieten fallengelassen. Es gab nur noch ein Testgebiet, welches an durch Los bestimmten Gewittertagen geimpft wurde (Randomisierung). Geimpfte und ungeimpfte Gewitter stammten somit aus dem gleichen Gebiet und der Vorwurf, dass ungleiche Gewitterhäufigkeit in den verschiedenen Gebieten das Resultat verfälschen würde, fiel somit weg. Aber auch hier zeigte sich nach siebenjähriger Versuchsdauer kein Erfolg. Ein neuer Versuch konnte daher erst nach einer wesentlichen Weiterentwicklung in wolkenphysikalischer, statistischer und experimenteller Hinsicht stattfinden. Der Großversuch IV (1976-1982) sollte diese Weiterentwicklung als Basis haben. In der Zentralschweiz wurde mittels AgJ-Raketen, die in ca. 6000 m das AgJ freisetzten, in einem Gebiet (das Testgebiet war wieder identisch mit dem Kontrollgebiet) mittels Randomisierung die Wirksamkeit der Wolkenimpfung überprüft. Die Impfmenge betrug fünf Kilogramm, das Impfkriterium war erstmals, um möglichst objektiv sein zu können, die Radarreflektivität.[36] Dabei wurde darauf geachtet, dass jene Rahmenbedingungen geschaffen wurden, wie sie bei den erfolgreichen Versuchen in den 1970er und 1980er Jahren in der Sowjetunion gegeben waren. Die Hagelabwehr war identisch zur sowjetischen in Bezug auf die Raketenwerfer (fünf Stück), Raketen, Radar für das Impfkriterium und das operationelle Prozedere. In der UdSSR sprach man von einer Hagelreduktion durch AgJ-Raketenimpfung von bis zu 90%. Beim Großversuch IV wurde als Testgröße die kinetische Energie der Hagelkörner, welche von einer Hagelzelle produziert und am Boden registriert wurde, gewählt. Diese Testgröße wurde auf zwei Arten bestimmt: Einerseits mit einem Hageldetektorennetz, das ähnlich funktionieren sollte, wie das heute in Niederösterreich und in der Steiermark verwendete, andererseits ein eigens entwickeltes Radargerät. Das Ergebnis des Großversuches IV war allerdings ernüchternd. Es zeigte keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen geimpften und ungeimpften Hagelzellen. Damit war klar, dass man zwar Nebel und

[35] Genaueres siehe Kapitel 10

[36] Genaueres in Kapitel 12.1.3

Stratusbewölkung eindeutig beeinflussen konnte, die Hagelwolken jedoch nicht nachweislich. Mögliche Gründe für diese Ergebnisse werden in Kapitel 8 erläutert.

Vorreiter in Sachen Einbringung von Gefrierkernen durch Wolkenimpfung waren die Amerikaner, die als erste die AgJ-Impfungen mit Flugzeugen durchführten. So fand ein Experiment bereits 1972 – 1974 in Colorado statt (G.B. Foote, C.A. Knight 1979, zitiert bei Waldvogel, 1993), dass ebenfalls keinen Wirksamkeitsbeweis lieferte.

In der ehemaligen UdSSR wurde die Raketenimpfung nicht nur mit Silberjodid, sondern auch aus Kostengründen mit dem billigeren Bleijodid durchgeführt.[37] Bereits im Jahre 1953 begann das sowjetische Raketenimpfprogramm unter anderem im Alasanital in Georgien. Zur Identifizierung hagelträchtiger Wolken wurden bereits Radargeräte[38] mit Wellenlängen zwischen 3 und 10 cm eingesetzt. Nach erfolgtem Aufspüren der Wolken wurden die Raketenabschussrampen in Stellung gebracht, wobei ganze Raketensalven gezielt abgefeuert werden konnten. Außerdem standen zwei Raketentypen (ALSANI I und ALSANI II) zur Verfügung, die eine Reichweite bis über 8000 Meter hatten und mit einer pyrotechnischen Impfmischung der Masse von einem Kilogramm, die zu 50% aus Bleijodid bestand, bestückt waren. Wie bei den von Flugzeugen eingesetzten Fackeln wurde der Impfstoff auch bei den ALSANI - Raketen nicht auf einmal durch Explosion in die Wolken gebracht, sondern während des Fluges bei einer Brenndauer von 35 Sekunden. Der Vorteil dieser Methode war aufgrund der hohen Reichweite der Raketen die Möglichkeit, sehr genau die Zone der Hagelbildung treffen zu können. Nicht zu unterschätzender Nachteil war allerdings eine enorme Gefährdung der zivilen Luftfahrt. Bis zu 90% weniger Schadhagel haben diese Versuche, wie oben schon erwähnt, angeblich gebracht. Dieselbe Methode wurde einige Jahre später auch im ehemaligen Jugoslawien und hier vor allem im heutigen Slowenien (Raum Maribor/Marburg) und Kroatien eingesetzt. Man setzte mobile Radarstationen ein, deren Entwicklung zunächst - wie auch in der Sowjetunion - militärischen Zielsetzungen galt und verwendete ebenfalls weit reichende CAKO-Raketen mit 400 Gramm Silberjodid als Impfstoff und ca. 5000 Meter Gipfelhöhe. Auch dort sprach man von Abwehrerfolgen von etwa 80% (siehe Abb. 6.4).

[37] Siehe auch Kapitel 7

[38] Genaueres siehe Kapitel 12.1.3

Abb. 6.4.: Hagelabwehrzentrale in Zikarce bei Marburg (Slowenien), im Vordergrund eine mobile Abschussrampe für CAKO – Raketen, im Hintergrund ein mobiles Radargerät, (aus: Szith, 1976)

Aufgrund der oben genannten Risiken dieser weit reichenden Raketen kamen in vielen Ländern Westeuropas (z.B. Deutschland, Österreich[39], Schweiz, Italien) Raketen mit wesentlich geringerer Reichweite (1500 bis 2000 Meter) zum Einsatz. Bei diesen Raketen wurde der Impfstoff (z.B. 16 Gramm Silberjodid) durch eine Explosion mit gleichzeitiger Selbstvernichtung auf einmal ausgebracht. Nachteil dieser Methode war sicherlich, dass die Hagelbildungszone, die ab ca. 4000 Meter über Grund liegt, nicht erreicht werden konnte. Wiederholt konnte man auch beobachten, dass Raketen viel zu spät abgeschossen wurden, sodass der bereits einsetzende Gewitterregen das Silberjodid nicht mehr in den Aufwindkanälen in die oberen Wolkenteile transportieren konnte.

Die billigste Methode zur Ausbringung von Wolkenimpfstoffen waren sicherlich die Bodengeneratoren, wie oben am Beispiel der Großversuche II und III in der Schweiz schon erwähnt, die in Aceton gelöstes Silberjodid in einer Propangasflamme verdampften und auf Bergkuppen oder anderen exponierten Geländepunkten aufgestellt wurden, wo starke Aufwinde zu erwarten waren. Problem bei dieser Methode war, niemals genau sagen zu können, ob das Silberjodid den Weg in die unterkühlten Teile der Hagelwolken mit Hilfe der Aufwinde finden würde und welchen Weg es nehmen würde.

[39] siehe auch Kapitel 10

Abb. 6.5.: Links: Raketenabschussrampe mit mobilem Radar (Steiermark), rechts: Instandsetzung eines Bodengenerators (Steiermark), aus: Lorber, Domittner, 2005

Ebenso ist gerade bei dieser Methode der photolytische Effekt (Zerfall des Silberjodids nach einer gewissen Zeit in für Hagelabwehrzwecke unbrauchbares Jod und Silber unter Einwirkung von Licht)[40] zu beachten. Diese Methode wurde in der Steiermark, in Italien (Raum Mantua), in Spanien und in Frankreich angewandt (R. Szith, 1976).

Jene Impfmethode, die auch heute von den meisten Hagelabwehrbetreibern angewendet wird, ist die Einbringung der Impfsubstanz mittels Flugzeugen. Der Vorteil dabei ist die punktgenaue Ausbringung am gewünschten Ort der Hagelwolke (sofern die meteorologischen Rahmenbedingungen es zulassen).[41] Wie schon oben erwähnt nahm die Methode der Silberjodidausbringung ihren Anfang in den USA, in North Dakota und in Colorado in den 1960er Jahren. Dabei wurden anders als heute Fackeln (z.B. die der OLIN Corporation aus East Alton, Illinois, USA) mit 25 Gramm Silberjodid, 60 Sekunden Brenndauer und einer Falldistanz von ca. 2700 Meter von oben in die Gewitterwolken geworfen, in der Hoffnung, dass das Silberjodid genau im Bereich der Hagelbildung für zusätzliche Gefrierkerne sorgen möge. In Europa wurden die ersten Befliegungen in der Schweiz (Gebiet Genfer See) und in Deutschland (Raum Rosenheim, Bayern) durchgeführt. In Niederösterreich im Raum Krems-Langenlois begann man mit den Befliegungen, nachdem man zuvor auf italienische Raketen zurückgegriffen hat, im Jahre 1977, in der Steiermark stiegen die ersten Hagelabwehrflugzeuge 1984 auf.[42] Ebenfalls sehr früh (seit 1971) begann man in Südafrika mit der Impfung von Hagelwolken. Dort wurden pro Flugzeug bis zu 52 Patronen eingesetzt, die

[40] Genaueres siehe Kapitel 5

[41] Genaueres zu den Befliegungen in Kapitel 7.4

[42] Genaueres siehe Kapitel 10

jeweils 50 Gramm Silberjodid freisetzten[43], eine Brenndauer von etwa 30 Sekunden hatten und in ca. 8000 – 9000 Meter Höhe bei Temperaturen von –5°C bis –15°C wirken sollten (Kolb, 1973).

Abschließend zu diesem Kapitel soll noch ein Überblick über die gegenwärtigen Aktivitäten der aktiven Hagelabwehr rund um den Globus gegeben werden, wobei auf die detaillierte Diskussion der Operationsmethoden an dieser Stelle verzichtet wird. Diese werden in Kapitel 7 genauer dargestellt.

Neben dem nach wie vor hauptsächlich eingesetzten Silberjodid als Impfsubstanz werden heute auch hygroskopische Salze wie beispielsweise Kochsalz (Natriumchlorid, NaCl) für die Wolkenimpfung verwendet[44]. Die Wirksamkeit dieser Substanz haben erstmals Dennis und Koscielski 1972 beschrieben (zitiert bei Stasenko, 2000). Bei dieser Methode geht es nicht darum, zusätzliche Gefrierkerne in den mittleren bis oberen Teil der Hagelwolke einzubringen, sondern an der Wolkenbasis vermehrt Kondensationskerne einzubringen, die ein Ausregnen der Wolke initiieren und beschleunigen sollen. Das bedeutet, dass diese Methode nicht nur zur Hagelverhütung eingesetzt wird, sondern auch, um Regen auszulösen. Dabei kondensiert an der warmen Wolkenbasis der Wasserdampf an winzigen Partikeln aus atmosphärischem Staub. Derzeit verwendet man diese Methode, die vom Kanadier Graeme Mather, dem „Regenmacher“, in den 1970er Jahren in Südafrika entwickelt wurde und später vom Franzosen Jean-Francois Berthoumieu übernommen und weiterentwickelt wurde, vor allem in Mexiko, den USA, Kanada, Südafrika, Frankreich und in der österreichischen Weststeiermark.

Die nach wie vor am meisten verwendete Substanz zur Wolkenimpfung ist das Silberjodid (AgJ), dessen Wirkungsweise in Kapitel 5 genauer dargelegt wird. Heute werden drei Haupttechniken für die Wolkenimpfung mittels AgJ (Silberjodid) angewandt[45]:

1. Bodengeneratoren, die AgJ-Aerosole kontinuierlich ausbringen,
2. Boden-Luft-Raketen, die das AgJ gezielt an bestimmte Punkte führen und
3. Flugzeuge, die mit Generatoren und/oder AgJ-Fackeln ausgestattet sind.

---

[43] Diese Menge entspricht nach Laborversuchen bei –10°C einer Zahl von ca. 50 x 10^{14} Gefrierkernen.

[44] Die weststeirische Firma „hail air“ kooperiert mit Prof. Berthoumieu und setzt seit dem Jahr 2002 neben AgJ auch NaCl zur Hagelbekämpfung ein. Genaueres siehe auch Kapitel 10.2.2

[45] Eine genauere Beschreibung der Operations- und Messmethoden erfolgt in Kapitel 7

Erstgenannte Methode mittels Bodengeneratoren wird heute kaum noch verwendet, da deren Effizienz nachweislich deutlich geringer als die der Raketen bzw. Flugzeuge ist (Dessens, 1986, zitiert bei Stasenko, 2000). Zwei der wenigen Länder, die diese Methode noch einsetzen, sind Frankreich und Kroatien. Unbestätigten Berichten zufolge sollen einzelne Länder der ehemaligen Sowjetunion ebenfalls auf diese Methode zurückgreifen. In der Steiermark wurden bis Mitte der 1980er Jahre Bodengeneratoren zur Hagelbekämpfung betrieben.[46]

Die Hagelabwehr durch den Einsatz von Boden-Luft-Raketen wurde federführend von den Sowjets entwickelt, die auch bei den Trägerraketen auf militärische Technologie zurückgriffen. Seit 1967 gibt es genaue wissenschaftliche Aufzeichnungen über diese Raketeneinsätze. Hier sei nochmals erwähnt, dass man in der ehemaligen Sowjetunion auch das gesundheits- und umweltbelastende Bleijodid (PbJ) als Impfsubstanz neben Silberjodid verwendet hat (siehe auch oben). Heute wird AgJ auch in den Nachfolgestaaten der ehemaligen Sowjetunion eingesetzt. Auch Argentinien und Brasilien können auf langjährige Erfahrungen mit dieser Technologie verweisen. Außerhalb von Europa setzt auch China erfolgreich auf den Einsatz von Raketen und „37 mm anti aircraft guns“ (Stasenko, 2000). In Osteuropa setzt Bulgarien heute diese Technik erfolgreich ein. In Serbien gab es im Jahr 2000 12 Radar-Stationen und 1300 Raketenabschussrampen, die insgesamt 96% der gesamten Agrarfläche Serbiens abdeckten[47]. Vucinic berichtete 1999, dass in den letzten 30 Jahren seit Bestehen des Raketenhagelabwehrprogramms die durch Hagel zerstörten Agrarflächen in Serbien von 10-15 % auf 2-3 % zurückgingen. In Mitteleuropa setzt Kroatien gegenwärtig diese Methode zur Hagelbekämpfung ein (Stasenko, 2000). Slowenien hat sein Hagelabwehrprogramm mangels eines Effizienznachweises Mitte der 1990er Jahre eingestellt.

In der Steiermark wurde zu Beginn der 1980er Jahre die letzte Hagelrakete abgefeuert.

Die heute mit Abstand weltweit am meisten eingesetzte Methode der aktiven Hagelabwehr ist die der Ausbringung von Impfsubstanzen (meist Silberjodid, auch Natriumchlorid) durch Befliegen der hagelträchtigen Wolken mit Flugzeugen. Die Amerikaner, die seit den 1960er Jahren diese Methode erfolgreich einsetzen, sprechen von „airborne seeding“. Heute setzen

[46] Dazu Genaueres in Kapitel 10.1

[47] Diese waren nach den Kriegsereignissen in den 1990er Jahren noch vorhanden und wurden für die Hagelabwehr adaptiert.

beinahe alle Länder, die aktive Hagelabwehr betreiben, Flugzeuge zur Ausbringung der Impfsubstanzen ein. Die WMO (World Meteorological Organization) erstellte ein „Register of National Weather Modification Projects“ für die Jahre 1990-1994. Demnach waren im genannten Zeitraum Aktivitäten der aktiven Hagelabwehr in 29 Staaten der Erde zu verzeichnen. 1999 versuchten etwa 40 Länder den natürlichen Niederschlag in geordnete Bahnen zu lenken, sei es um Hagel zu verhindern und / oder Niederschlag hervorzurufen (Breuer, 1999). Außerhalb von Europa betreiben unter anderem Australien, China, Thailand, Südafrika, die Vereinigten Arabischen Emirate, Mexiko, Guatemala, Brasilien, Argentinien, Kanada und die USA in 29 Bundesstaaten aktive Hagelabwehr und / oder „Regenmacherei“. Japan beispielsweise verzichtet auf aktive Hagelabwehr und setzt ausschließlich auf passive Hagelabwehrmethoden durch Schutznetze. In den USA begann man schon 1961 im Westen North Dakotas mit der Ausbringung von Silberjodid durch Befliegung. Heute werden Silberjodid und auch Trockeneis als Impfsubstanz verwendet, wobei das Silberjodid in Form des hygroskopischen Komplexes AgJ-AgCl-4NaCl in die Wolken eingebracht wird[48]. Diese Entwicklung wurde seit 1970 ganz wesentlich vom NHRE (National Hail Research Experiment) getragen.

Russland und die Länder der ehemaligen Sowjetunion setzten ebenfalls auf aktive Hagelabwehr, wobei diese Länder vorwiegend auf den Einsatz von Raketen vertrauen (siehe oben). Interessant dabei ist die Erkenntnis von Abshaev (1994), dass eine besonders hohe Effizienz bei lokalen und schwächeren Hagelgewittern (vor allem in Aserbaidschan, Moldawien, der Ukraine und Usbekistan) zu verzeichnen waren, eine etwas geringere Effizienz bei Superzellen-Hagelgewittern (vor allem im Nordkaukasus, Armenien und Georgien).

In Europa sind die Aktivitäten der aktiven Hagelabwehr im Westen in Frankreich, im Südosten in den Balkanländern (Kroatien und Serbien) und in Mitteleuropa in Norditalien (Friaul / Venetien mit dem Zentrum Cervignano), in Südtirol, in der Schweiz, in Deutschland (Räume Stuttgart und Rosenheim) sowie in Österreich (Räume Krems / Langenlois in Niederösterreich sowie die West-, Süd- und Oststeiermark) gegeben. In Deutschland begann das Rosenheim-Projekt bereits 1975 mit zwei Flugzeugen, die AgJ-Generatoren an Bord hatten. In Österreich setzte man im Raum Krems ab dem Jahr 1977 Hagelabwehrflugzeuge ein. In der Steiermark stieg der erste „Hagelflieger“ 1984 auf. Da die steirischen Hagelabwehraktivitäten den Schwerpunkt dieser Arbeit bilden, wird später noch genauer darauf eingegangen.

---

[48] siehe auch Kapitel 5.8

Das erweiterte Wissen durch intensive Forschung hat in den letzten Jahren beachtliche Entwicklungen hervorgerufen. Vor allem ging es darum, neben der Verbesserung der technischen Ausrüstung die Vorgänge der Ausbreitung der Impfsubstanzen in der Wolke möglichst genau nachvollziehen zu können. Dabei hat man Computerprogramme entwickelt[49], die mit verbessertem Radar in Kombination diese Vorgänge dreidimensional sichtbar machen sollen. Bisher war man hier auf Schätzungen und Vermutungen angewiesen. Diese und andere Entwicklungen, wie zum Beispiel das „Regenmachen“ werden in Kapitel 7 und 8 genauer dargelegt.

[49] z.B. TITAN (USA), ANTIGRAD (Russland) und AMRAS (Kroatien).

7. Operations- und Messmethoden der aktiven Hagelabwehr in Geschichte und Gegenwart

In diesem Kapitel werden kurz ehemalige und ausführlicher gegenwärtige Hagelbekämpfungsmethoden erläutert, wobei die gegenwärtige Operationsmethode der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft in Kapitel 11 genauer beleuchtet wird.

7.1. Hagelabwehr durch Schall

Das Wetterläuten und besonders Wetterschießen soll ungeachtet sonstiger mehr oder weniger effizienter Methoden zur Hagelverhütung und –bekämpfung (z.B. Gebete, kultische Rituale etc.) an den Beginn dieses Kapitels gestellt werden, da mit der Methode der Schallentwicklung erstmals eine naturwissenschaftlich begründete Hagelbekämpfungsmethode in Erscheinung trat. Über andere Methoden, die eher spiritueller Natur waren, wurde bereits in Kapitel 6.1 ausführlich berichtet. Was die Wirksamkeit des Wetterschießens betrifft, konnte schon eine Expertenkonferenz im Jahre 1902 mehrheitlich deren Unwirksamkeit vermuten (siehe auch Kapitel 6.1). Im Wesentlichen wurde mit dieser Methode eine Kanone, deren Öffnung trichterförmig und vertikal nach oben gerichtet war, verwendet. Das Ziel dabei war, mittels Schalldruck Hagelkörner zu zersprengen („Kavitation“), wobei zu Testzwecken Versuchsanlagen errichtet wurden, die aus in große Holzrahmen gespannte Papierflächen von einigen Quadratmeter Durchmesser bestanden (siehe Abb. 6.3 und Abbildungen im Anhang). Diese Holzkonstruktionen wurden in Abständen von einigen Zehnermetern hintereinander aufgestellt. Dann wurde versucht, durch den sich durch Abfeuern einer Kanone (natürlich ohne Kugel, es wurde Schwarzpulver zur Explosion gebracht) ausbreitenden Schall diese Papierwände zu durchschlagen. Der Erfolg war bescheiden. In den USA versuchte man ebenfalls um das Jahr 1900 mit an Ballons und Drachen befestigten Dynamitstangen Wolken platzen zu lassen, doch diese Experimente scheiterten kläglich (Breuer, 1999). In Müller (1996) wird auf eine Expertise von Mezeix aus dem Jahr 1974 eingegangen, die klar die Unwirksamkeit der Zertrümmerung von Hagelkörnern durch Schallwellen nachweist.

7.2. Hagelabwehr durch den Einsatz von Bodengeneratoren

Bodengeneratoren wurden in beinahe allen Pionierländern der aktiven Hagelabwehr Europas, wie beispielsweise Frankreich und die Schweiz eingesetzt. Wie schon in Kapitel 6.1 geschildert, wurden bis Mitte der 1980er Jahre auch in der Steiermark bis zu 130 in mehreren Kränzen entlang des Steirischen Randgebirges angeordnete Bodengeneratoren eingesetzt[50]. Bei dieser billigsten Methode zur Ausbringung von Wolkenimpfstoffen wurde in Azeton gelöstes Silberjodid in einer Propangasflamme verdampft, wobei die Standorte auf Bergkuppen oder anderen exponierten Geländepunkten starke Aufwinde erwarten ließen. Problem bei dieser Methode war, niemals genau sagen zu können, ob das Silberjodid den Weg in die unterkühlten Teile der Hagelwolken mit Hilfe der Aufwinde finden würde und welchen Weg es nehmen würde.

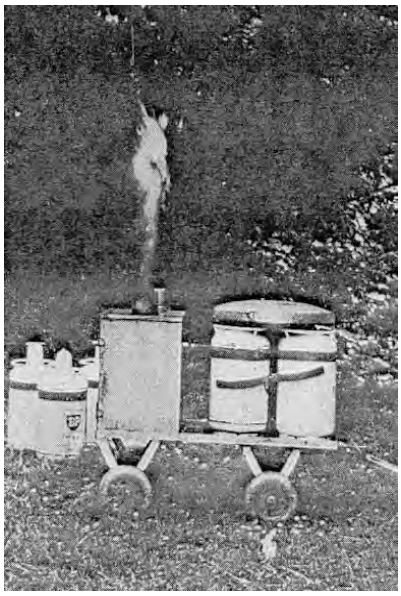


Abb. 7.1.: Bodengenerator in der Steiermark um 1965 – 1970 (aus: Szith, 1976)

Neben dieser nicht allzu großen Effizienz, die sich später durch den Einsatz von Flugzeugen deutlich steigern sollte, hatte man im Laufe der Zeit auch zuwenig Personal für die Betreuung der Stationen zur Verfügung. Die meisten Betreuer waren Landwirte, die in unmittelbarer Nähe der Generatorstandorte wohnten bzw. arbeiteten und über Radio von bevorstehenden Einsätzen informiert wurden. Der Strukturwandel in der Arbeitswelt und der damit verbundene Rückgang an in der Landwirtschaft Beschäftigten sorgte zusätzlich neben der mangeln-

[50] Karte der Standorte siehe Kapitel 10.1 (Abb. 10.1)

den Effizienz dieser Methode für die Einstellung derselben. Heute setzt beispielsweise Kroatien neben den in Kapitel 7.3.1. geschilderten Raketen Bodengeneratoren für die Hagelabwehr ein.

7.3. Hagelabwehr durch den Einsatz von Boden-Luft-Raketen

Die Anfänge dieser Technologie wurden bereits in Kapitel 6.2 geschildert, als etwa die ehemalige Sowjetunion, und die Staaten des ehemaligen Jugoslawien mittels Raketenabschussrampen (Einzelrampen und Raketenwerfer) weit reichende Raketen mit Gipfelhöhen bis zu 4500 m (Kroatien in den 1980er Jahren) oder sogar 8000 m (UdSSR) einsetzten. Dabei wurden einerseits pyrolytische Impfmischungen verwendet, die durch eine Explosion auf einmal in die zu impfende Wolke gebracht wurden, andererseits durch Brenndauern von etwa 35 Sekunden über einen längeren Zeitraum größere Bereiche der Wolke behandelt werden konnten. Als Impfsubstanz wurde Silberjodid oder das schädigende Bleijodid, letzteres von der UdSSR und Ungarn, eingesetzt. Ein Vorteil dieser Methode liegt sicherlich in der guten Zielgenauigkeit ins Zentrum der Hagelbildungszone. Die Betreiberstaaten sprechen von 80-90% Rückgang von Schadhagel (R. Szith, 1976). Ein entscheidender Nachteil jedoch ist die Gefährdung der zivilen Luftfahrt durch die großen Flughöhen der Raketen. In der Schweiz wurde etwa der Großversuch IV mit Raketen durchgeführt[51]. In Österreich setzte man seit den 1960er Jahren bis Mitte der 1980er Jahre Raketen (zunächst auch Granaten aus Fliegerabwehrkanonen) mit Flughöhen von 1500 – 2000 m ein, die hinsichtlich der Gefährdung der zivilen Luftfahrt kaum problematisch waren, jedoch die Hagelbildungszonen der zu impfenden Wolken, die meist in 4000 m Höhe über Grund liegen, nicht mehr erreichen konnten. Wie schon in Kapitel 6.2 erwähnt, setzen heute unter anderem China, die Nachfolgestaaten der ehemaligen Sowjetunion, Serbien, Kroatien und Mazedonien diese Methode erfolgreich ein. Dabei werden weit reichende Raketen allerdings in Kombination mit modernen Radarstationen eingesetzt.

[51] siehe auch Kapitel 6.2. und 8.

7.3.1. Das kroatische Raketen-Hagelabwehrprogramm

Damir Počakal, Leiter des kroatischen Hagelabwehrprogramms mit Sitz in Varaždin und Mitentwickler des modernen Radarsystems AMRAS, berichtet anlässlich einer Sitzung der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft am 20.11.2001 in Mitterdorf, dass Kroatien nach wie vor auf die Methode der Wolkenimpfung durch Raketenbeschuss setzt, da auf diese Weise eine wesentlich genauere Beimpfung stattfinden kann als mit der Befliegung durch Flugzeuge. Die Gefahren für die zivile Luftfahrt werden durch die Zusammenarbeit mit den kroatischen Flugbehörden und den Einsatz moderner Radaranlagen gering gehalten.[52] In den 1970er Jahren wurden noch Raketen mit geringer Reichweite (ca. 1500 m) aus Serbien, Montenegro und Mazedonien verwendet, in den 1980er Jahren setzte man Mittelstreckenraketen ein (Reichweite 3 – 4,5 km) und seit 1995 hat man Langstreckenraketen mit einer Reichweite von 5,5 – 7,5 km zur Verfügung. In den Jahren 1992-1994 konnte wegen des Balkankrieges keine Hagelabwehr betrieben werden. Die militärischen Raketenabschussanlagen werden jedoch von Kroatien nach dem Krieg für die Hagelabwehr genutzt, wobei seit 1995 auch eine neue Generation von Raketen mit einem besseren Impfreagenz, dass 10^{13} gegenüber 10^{11} Keimen bei den alten Raketen zum Einsatz bringt. Zur Unterstützung standen von 1972 – 1975 alte Militärradars zur Verfügung, die allerdings sehr leistungsfähig waren und auch schon ein Echtzeitbild ermöglichten, d.h. dass man die tatsächliche Flugbahn der Raketen im selben Augenblick auf dem Radarschirm verfolgen konnte. In den 1980er Jahren standen zwei große meteorologische Radaranlagen aus den USA zur Verfügung (in Zagreb und Osijek**),** seit 1995 stehen drei digitale Doppler-Radar mit einem Reichweitenradius von 300 km zur Verfügung (in Zagreb, Osijek und Bilogora), zusätzlich stehen noch fünf weitere Anlagen mit Radien von je etwa 100 km zur Verfügung. Seit 2001 ist Kroatien außerdem Mitglied im „Hagelabwehrverbund Mitteleuropa“, dem auch die Regionen Steiermark, Niederösterreich und Rosenheim (Bayern) angehören und der sich zum Ziel gesetzt hat, die jeweiligen Hagelabwehraktivitäten (in der Steiermark, Niederösterreich und Bayern werden Flugzeuge zur Hagelbekämpfung eingesetzt) zu vernetzen und durch Informationsaustausch immer auf dem neuesten Stand von Wissenschaft und Technik zu sein.

[52] Genaueres siehe Kapitel 12.1.3

7.4. Hagelabwehr durch den Einsatz von Flugzeugen

Wie schon oben in Kapitel 6.2 erwähnt, wurden die ersten Befliegungen in den 1960er Jahren in den USA durchgeführt. Heute werden im Wesentlichen zwei Arten von Impftechniken bei der Befliegung von hagelträchtigen Wolken von allen etwa 40 Ländern, die Flugzeuge zur Hagelbekämpfung einsetzen, verwendet.

1. Generatoren mit Brennern: Sie sind an den Flugzeugen montiert (meist zwei Stück), die Verbrennung eines Gemisches aus Aceton und der Impfsubstanz findet unter Luftzufuhr statt. In der Steiermark wird beispielsweise eine 6 % ige AgJ-Aceton-Lösung verwendet, wobei das AgJ als kolloidales Teilchen in die Wolke gelangt.[53]

2. Fackeln: Bestehen aus Treibsätzen mit einer Sprengladung, wobei die Reagenzmischung durch einen Elektroimpuls gezündet wird und so die Impfsubstanz während einer Brenndauer von einigen Minuten in den zu impfenden Bereich gelangt. Fackeln sollen zusätzlich zu den Generatoren in bestimmten Wolkenregionen für eine deutliche Erhöhung der Gefrierkernkonzentration sorgen. Meist sind sie links und rechts an die Brenner der Flugzeuge montiert oder mit einer speziellen Konstruktion direkt an die Flugzeugflügel. Pro Einsatz werden 10 – 20 Fackeln mitgeführt.

Abb. 7.2.: Fackeln der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft (aufgenommen am 20.08.2001)

In den frühen 1960er Jahren hatte man in den USA Fackeln von oben in die zu beimpfenden Wolken geworfen. Heute fliegt man mit dem Flugzeug einerseits unter einem lokalen, stationären „Hagelturm“ (z.B. eine Cumulonimbus-Wolke) und bringt die Impfsubstanz so aus,

[53] Eine detaillierte Schilderung des operationellen Vorgehens der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft siehe Kapitel 11

dass sie durch die Aufwinde in die Wolke gelangt, andererseits fliegt man vor einem Hagelsturm entlang der sich mehr oder weniger rasch fortbewegenden Böenwalze hin und her und bringt das Impfgut so in die hagelträchtigen Wolkenteile.

Als Impfsubstanzen werden als Gefrierkerne, die in höheren Wolkenteilen an den Orten der Hagelbildung wirken sollen vor allem Silberjodid und früher Bleijodid eingesetzt[54]. Ganz selten wurden auch Phlorogluzinol, Metaldehydrid und KJ-AgJ_Lösungen verwendet. Als Kondensationskerne werden hygroskopische Salze wie Natriumchlorid (Kochsalz) oder Kaliumchlorid an der warmen Wolkenbasis eingesetzt. Dadurch will man erreichen, dass es zu verstärkter Tröpfchenbildung kommt und Regen ausgelöst wird. In den USA wird in jüngster Zeit auch Trockeneis und Silberjodid, letzteres in Form eines hygroskopischen Komplexes der Form AgJ-AgCl-4NaCl eingesetzt[55]. Damit versucht man gleichzeitig „zwei Fliegen mit einer Klappe zu schlagen“, nämlich Hagel zu verhüten und Regen auszulösen. Heute werden Flugzeuge mit Generatoren und Fackeln in Kombination mit guten Radar-Technologien und Wolken-Computerprogrammen eingesetzt[56]. M. Dixon entwickelte 1993 das Programm TITAN, mit dessen Hilfe man in dreidimensionaler Darstellung die dynamischen Prozesse in einer Wolke zeigen kann und so die Wege der Impfsubstanzen verfolgen kann. Allerdings ergibt sich trotz hoher Rechnerleistung das Problem, dass man kaum entscheiden kann, ob Niederschlag künstlich oder auf natürlichem Wege ausgelöst wurde (Filatsch, 2001). Auch für den absoluten Nachweis der Silberjodidwirkung anhand eines konkreten Impfvorganges ist es noch zu früh. Jedenfalls ist die Anschaffung dieses Programms für die steirische „hail air“ geplant. Erste Ergebnisse wurden noch nicht veröffentlicht. Weitere Programme wie ANTIGRAD in Russland und AMRAS in Kroatien werden seit wenigen Jahren getestet und erste Ergebnisse sollten in den nächsten Jahren vorliegen.

[54] Die genaue Wirkungsweise von Silberjodid wird in Kapitel 5 erläutert.
[55] Weitere moderne Impfsubstanzen siehe Kapitel 5.8
[56] Siehe auch Kapitel 8

8. Bisherige Arbeiten und aktueller Forschungsstand

In diesem Kapitel sollen einige Arbeiten genannt werden, die in Fachkreisen der aktiven Hagelabwehr speziell in Mitteleuropa besonders häufig genannt und diskutiert wurden und werden. Insgesamt fällt auf, dass die Arbeiten, die kritisch bis ablehnend die Effizienz der aktiven Hagelabwehr beurteilen, in der Mehrzahl sind.

Eines der bekanntesten Hagelabwehrexperimente (und daher hier etwas genauer vorgestellt) fand nach einigen Vorversuchen in der Zeit von 1977 – 1983 in der Zentralschweiz statt, der so genannte „Großversuch IV“[57]. Der Versuch wurde von neutraler Seite, nämlich dem Schweizer Departement für Landwirtschaft der Schweizer Regierung, finanziert und wurde als internatonales randomisiertes Experiment[58] in der Zentralschweiz durchgeführt. Dabei sollte die Hypothese, dass das Impfen potentieller Hagelzellen mit Silberjodid zu einer Verminderung der kinetischen Hagelenergie führe, experimentell getestet werden. Zwischen 15.5. und 15.9. wurde eine Gewittervorhersage für das Testgebiet gemacht. Bei einer Gewitterwahrscheinlichkeit von > 30 % wurde dieser Tag zum Alarmtag erklärt und eine zufällige Impf-/Nichtimpfentscheidung getroffen. Mit Hilfe von Radar und Radiosondenaufstiegen bzw. mit Erreichen des „Radarkriteriums“[59] wurden nach sowjetischem Vorbild Raketen von Abschussrampen aus in die potentiellen Akkumulationszonen von unterkühltem Wasser in den Wolken geschossen. Etwa in einem Drittel der untersuchten ungeimpften Fälle kam am Boden trotz erfülltem Kriterium kein Hagel vor, folglich war das Radarkriterium auf der sicheren Seite (Waldvogel et al., 1979, zitiert bei Schiesser, 1994). An Impftagen bekämpfte man die Hagelzelle alle fünf Minuten mit einer Rakete, solange das dauernd neu vermessene Impfkriterium erfüllt war. Die primäre Testvariable war die kinetische Hagelenergie, die einerseits von einem quantitativen 10 cm-Radar vermessen wurde, andererseits von einem dichten Bodennetz von Hageldetektoren. Vergleiche zwischen den Radarenergien mit den Energiewerten der Detektoren (zwei Hageldetektornetze mit insgesamt 335 Detektoren, jeder eine Fläche von 4 km² repräsentierend) zeigten eine gute Übereinstimmung (Waldvogel et al., 1979, zitiert bei Schiesser, 1994).

[57] siehe auch Kapitel 6.2.

[58] Eine große Anzahl von behandelten und unbehandelten Hagelzellen wurden miteinander verglichen, welche zufällig (randomisiert) ausgewählt wurden.

[59] Auch „Impfkriterium“ genannt, wird in Kapitel 5 erläutert

Die Studie führte zu folgendem Hauptresultat: Es konnten keine signifikanten Unterschiede in der kinetischen Hagelenergie zwischen geimpften und ungeimpften Zellen sowohl für Radardaten als auch Hageldetektordaten nachgewiesen werden. Es wurde also kein Effekt in der Größenordnung von 70 - 80 % Schadhagelverminderung, wie von russischer Seite behauptet, festgestellt (Schiesser, 1994). Es zeigte sich sogar ein statistisch signifikanter Anstieg der vom Radar hergeleiteten kinetischen Hagelenergie nach erfolgter Impfung. Allerdings müssen folgende Fakten beachtet werden:

1. Eine statistische Aussage allein sagt noch nichts über die physikalische Plausibilität aus. Der physikalische Zustand der Embryonenzelle bzw. die genaue Wolkendynamik konnte bei diesem Experiment nicht studiert werden.

2. In kleinen und mittleren Hagelzellen konnten Gewitterpenetrationen mit einem gepanzerten Testflugzeug durchgeführt werden (allerdings erst im August 1982, zu einem Zeitpunkt, als die letzten Raketen schon verschossen waren). Hier zeigte sich, dass die Konzentrationen von großen Tropfen (Durchmesser > 1 mm) für eine effiziente Hagelabwehr viel zu klein war (Waldvogel 1978, zitiert bei Schiesser, 1994). Während der gesamten Messkampagne 1982/1983 gab es keine Flüge durch starke Hagelzellen. So blieb die Frage offen, ob sich in großen Stürmen solche Zonen mit erhöhter Konzentration von großen Tropfen bilden können – die Impfhypothese konnte also nicht vollständig widerlegt werden (Schiesser, 1994).

3. Das Impfen selbst konnte wegen logistischer Probleme (mehrere Zellen mussten zur gleichen Zeit behandelt werden, Kommunikationsprobleme mit den Impfmannschaften, falsche Interpretation der Gewitterstruktur) und technischer Probleme (Versagen der Raketen, Ausfall des Radars) nicht ausreichend häufig durchgeführt werden.

4. Man hatte nur konventionelle Radargeräte von 3 cm und 10 cm Wellenlänge zur Verfügung. Weder die heute üblichen Doppler- noch Polarisationsmessungen standen zur Verfügung.

5. Der Versuch zeigte, dass die Hauptfrage nach der grundsätzlichen Beeinflussbarkeit von Hagelzellen unbeantwortet blieb.

6. Eine wesentlich Erkenntnis dieses Versuches für nachfolgende Studien war die Entdeckung, dass etwa die Hälfte der starken Hagelzellen linksziehende Gebilde waren und diese Zellen auch noch Strukturen aufwiesen, die die Aufwindgebiete am falschen Ort

vermuten ließen (Houze et al., 1993, zitiert bei Schiesser, 1994). Bis dahin vermutete man, dass fast alle großen Zellen rechts vom mittleren Umgebungswind ziehen und somit vorne rechts (in Zugrichtung) zu impfen seien.

7. Die Schlussfolgerung dieses Versuches ist daher, dass das Verständnis der dynamisch-physikalischen Prozesse in der Hagelwolke verbessert werden muss. Hilfreich dabei könnten verbesserte Radaranlagen (dreidimensionale Messung mit feiner zeitlicher Auflösung < 5 Minuten, mit Dopplerinformation über die kinetischen Prozesse und Polarisationsmöglichkeit zur Erkennung von Wasser- und Eisphase) in Ergänzung mit dreidimensionalen Modellsimulationen von Hagelzellen (Schiesser, 1994).

Genau jene in Punkt 7 angesprochenen Vorschläge wurden in jüngster Zeit zum Teil bereits realisiert, wie später noch genauer ausgeführt werden wird.

In den Jahren 1980 – 1989 wurde im Raum Stuttgart ein Hagelabwehrexperiment mit Flugzeugbefliegung und AgJ-Impfung durchgeführt, bei dem ebenfalls - wie heute in der Steiermark – Hageltestplatten verwendet wurden. Die Auswertung des Stuttgarter Versuchs zeigte, dass im Versuchszeitraum pro Hagelereignis und pro Fläche und Zeit (Zeiteinheit: 1 Tag) eine deutliche Minderung der Hagelenergie zu verzeichnen war (W. Müller, 1993).

Eine weitere Studie von internationaler Bedeutung untersuchte bereits die heute am häufigsten eingesetzte Hagelabwehrmethode der Befliegung von Hagelwolken. Bei dieser Methode geht man davon aus, dass die Aufwinde die an der Wolkenbasis der vermuteten Hagelwolke ausgebrachte Impfsubstanz (im konkreten Fall Silberjodid) schon an den richtigen Ort bringen würde, man müsse nur genügend impfen. H. Höller und P. F. Meischner (1993) von der DLR (Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt) untersuchten Flugzeugimpfungen von Hagelwolken im Raume Rosenheim (Bayern). Bei dem Forschungsvorhaben ging es um die „Untersuchung von mikro- und makrophysikalischen Strukturen und Prozessen in Hagelwolken im Hinblick auf deren Beeinflussbarkeit“. Die Autoren wiesen dabei selber darauf hin, dass eigentlich nur ein randomisiertes Experiment für eine solche Untersuchung zulässig wäre, dies aber aufgrund der Weiterführung der operationellen Hagelabwehr im Untersuchungszeitraum und – gebiet nicht möglich war. Die Autoren setzten dabei ein neues Doppler-Polarisationsradar ein und konnten somit sowohl Hagel von Regen unterscheiden als auch Informationen über die Strömungen in den Wolken ableiten. Der Untersuchungszeitraum umfasste die Jahre 1987 bis 1992. Als Ergebnis der Studie schreiben die Autoren: *„…dabei zeigte sich, dass, unter Berücksichtigung aller in*

Betracht kommender Einflussgrößen, die Wolkenimpfung nahezu keinen Effekt auf die am Boden zu erwartenden Hagelschäden hat. In Übereinstimmung hiermit lässt sich aus der sechsjährigen Statistik der regionalen Verteilung der mit Hilfe von Radarmessungen ermittelten Hageltage kein Effekt feststellen, welcher der Wolkenimpfung zugeschrieben werden kann." Die Autoren traten seither als die größten Kritiker der aktiven Hagelabwehr auf und unterstreichen das durch ihre Aussage: *„Es erscheint unwahrscheinlich, dass es in Zukunft eine andere, praktikable Methode der Hagelbeeinflussung geben wird, für die ein Nachweis ihrer Wirksamkeit gelingen kann."* Ebenso stellten sie als Ergebnis ihrer Studie die Existenz einer Akkumulationszone, in welcher große unterkühlte Tropfen durch Impfen zum Gefrieren angeregt werden, in Abrede.

Zwei entscheidende Dinge räumen die Autoren in Ihrer Studie allerdings selbst ein: *„Dabei hat es sich gezeigt, dass die Prozesse noch komplexer als anfänglich vermutet sind und sich aller Wahrscheinlichkeit nach nicht beeinflussen lassen."... „Eine direkte und objektive Erfassung der Hagelfälle am Boden sollte sichergestellt sein."* Genau diese zwei Punkte bilden die Angriffsflächen der Studie. Es lag keine Erfassung der Bodenhagelsituation vor und man konnte die Wege des Silberjodid in der Wolke nicht genau nachvollziehen.

Zahlreiche weitere Studien aus den USA (beispielsweise von Knight et al. 1979 oder Smith 1992, zitiert bei Höller/ Meischner, 1993) führten zu ähnlichen Ergebnissen. Bei ersterer Studie der NHRE (National Hail Research Experiment) stellte sich heraus, dass die zu untersuchenden Hagelwolken zu kalt waren, um größere Mengen von Regentropfen im unterkühlten Zustand zu enthalten. Deren Vorhandensein war aber eine unabdingbare Voraussetzung für die zu Grunde gelegte Impfhypothese (Höller, Meischner 1993). Beim oben genannten Großversuch IV untersuchte man zwar wärmere Wolken, es stellte sich aber auch hier kein Erfolg ein (siehe oben).

In der Steiermark wurde unterdessen an weiteren Studien gearbeitet. Die Steirische Hagelabwehrgenossenschaften beauftragte unter Anleitung von Hans Gobec den Diplomanden Bernhard Hobiger der TU Graz, Institut für Nachrichtentechnik und Wellenausbreitung, mit der Entwicklung eines Computerprogramms, welches alle relevanten Einfluss- und Wirkungsgrundlagen vernetzen sollte. Dieses Programm wurde 1992/1993 fertig gestellt und nach Einfließen von Verbesserungsvorschlägen des Autors dieser Arbeit im Jahr 1997 von

Kurt Weninger und weiters im Jahr 2001 von Michael Übeleis weiter entwickelt.[60] Die Betreuer aller drei Diplomarbeiten waren Walter Randeu und Konrad Köck, die auch die für die steirische Hagelabwehr relevanten Wetterradars der Austro Control Zirbitzkogel und Schwechat für die Genossenschaft verfügbar machten und ständig verbesserten.[61] Alle Untersuchungen führten ebenfalls zum Ergebnis, dass kein konkreter Nachweis der Wirksamkeit der Silberjodidimpfung von Hagelwolken erbracht werden konnte. Das Hauptproblem bei allen drei Studien war jedoch die lückenhafte Datenverfügbarkeit.

Die im Oktober 2004 von Otto Svabik (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien) veröffentlichte Studie über einen vollständig verfügbaren Datensatz über die Auswertung der Hageltestplatten (z.B. Korngrößen, kinetische Energie) im Einsatzgebiet der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft, deren Ergebnisse für diese Arbeit zur Verfügung standen, liefert zwar keine physikalisch überprüfbaren Messergebnisse durch Vergleich mit einer Vielzahl an Einfluss- und Wirkungsgrundlagen für jeweilige Einzelhagelereignisse, wie sie für diese vorliegende Arbeit verwendet wurde, sondern Otto Svabiks Studie trifft eine sehr klare und signifikante statistische Aussage: Im Untersuchungszeitraum 1982 – 2001 gingen die Schadhagelfälle im Vergleich zu den Jahren ohne Hagelabwehr deutlich zurück, ebenso konnte festgestellt werden, dass in den Hagelkornspektren der letzten Einsatzjahre die kleinen Kornklassen stark zugenommen und die gröberen Kornklassen stark abgenommen haben[62].

Bei einem Sachverhalt sind sich sämtliche Befürworter und auch Skeptiker bzw. Gegner der aktiven Hagelabwehr einig: Die Wirkung von Silberjodid als Gefrierkern ist unbestritten, wurde bereits 1947 von Vonnegut nachgewiesen und seither durch zahlreiche Experimente und Studien nachgewiesen (beispielsweise von Finnegan, 1998), wenngleich die genauen Vorgänge in den beimpften Wolken nach wie vor nicht restlos geklärt sind[63].

[60] Diese Programme werden in Kapitel 13 kurz erläutert.
[61] siehe Kapitel 12.1.3.
[62] siehe auch Kapitel 12.2.3.
[63] siehe auch Kapitel 5.

Nachfolgend sind jene wissenschaftlichen und technischen Neuerungen aufgelistet, die es möglich machen sollen, die komplexe Dynamik in Gewitterwolken besser zu verstehen (nach Stasenko, 2000):

- Einsatz von Doppler-Polarisationsradars mit horizontaler und vertikaler Polarisation
- in der Luft befindliche K-Band und X-Band Radars
- neue Instrumente an Flugzeugen, um das Wolkenwasser zu untersuchen
- Einsatz auch von hygroskopischen Fackeln
- GPS – Unterstützung zur Flugzeugortung
- Verbesserte Impfsubstanzen (z.B. höherer AgJ-Gehalt bei Fackeln und Raketen; neue Gefrierkomplexe wie $AgCl \cdot I \cdot_x NaCl$) [Finnegan, 1998] bzw. bessere Effizienz bei der Ausbringung (neue Generator / Brenner-Systeme)
- Computerprogramme und neue Radarsysteme zum besseren Verständnis der dynamischen Vorgänge in den Wolken (TITAN, ANTIGRAD, AMRAS)
- Einsatz von „Tracern“ wie z.B. SF_6, um die Ausbreitung der Impfsubstanzen studieren zu können.
- Blitzregistrierung[64] und verbesserte Satelliteninformationen
- verbesserte Hagelvorhersage
- kombinierte Radar- und radiometrische Methoden (zur Wolkentemperaturmessung) zur Erfassung der Zonen mit unterkühlten Tropfen[65]
- Numerische Modelle zur Simulation der Wolkendynamik, der Hagelbildung und -entwicklung und der Seeding-Effekte[66]

Diese oben aufgelisteten Methoden und Technologien existieren zum Teil seit den 1990er Jahren und werden seither zunehmend von den Hagelabwehrbetreibern - so es die finanziellen Mittel erlauben - eingesetzt.

---

[64] In den 1990er Jahren erkannten amerikanische Forscher den Zusammenhang zwischen Polaritätsänderungen der Blitze und starken konvektiven Ereignissen in Wolken. So stellte man fest, dass man aus der Art der Blitze auf die inneren Vorgänge in Wolken schließen kann und damit auch Hagelbildungsprozesse ausmachen kann.

[65] GALPERIN et al. (1996) konnten zeigen, dass eine konvektive Zelle von 10 km Höhe die Region der unterkühlten Tropfen im oberen Teil der Wolke in der Größe von 1-3 km für eine Dauer von 4-5 Minuten enthält. Dies scheint ein Beweis für die Existenz dieser von Höller / Meischner (1993) negierten und für die AgJ-Impfung nicht unwichtigen Akkumulationszone zu sein. (siehe auch Kap.5.1)

[66] „Seeding“: engl. Säen, wird in der Hagelforschung für den Vorgang der Wolkenimpfung verwendet.

Um Synergieeffekte hinsichtlich der Forschungsarbeit zur Verbesserung der Hagelabwehrtechnologien zu erreichen, wurden in den letzten Jahren internationale Kooperationen geschlossen. „EUROHAIL“ ist ein Hagelabwehrprogramm, das von Italien und Slowenien initiiert wurde und mittlerweile sieben europäische Länder als Mitglieder verzeichnet (Stasenko, 2000). Der HVM (Hagelabwehrverbund Mitteleuropa) wurde 2001 gegründet und zählt Kroatien, die Steiermark, Niederösterreich und Bayern zu seinen Mitgliedern.

Zusammenfassend kann man sagen, dass in den letzten Jahren das Bestreben durch die Entwicklung und den Einsatz oben genannter neuer Technologien verstärkt wurde, die mikrophysikalischen und dynamischen Prozesse in den Wolken besser zu verstehen. Ebenso ist eine zunehmende Tendenz zur wissenschaftlichen Begleitung der operationellen Tätigkeit der Hagelabwehrbetreiber weltweit zu erkennen. Dies sicher auch, um die Geldgeber bzw. Kunden von der Sinnhaftigkeit der aktiven Hagelabwehr zu überzeugen. Ebenso ist man durch Schließen internationaler Kooperationen bemüht, das mangelnde wissenschaftliche Interesse an der Frage der aktiven Hagelabwehr weltweit zu reduzieren, um so die Zahl der Skeptiker und Negierer der aktiven Hagelabwehr in der internationalen Fachwelt zu verringern.

9. Offene Fragen

Die im vorigen Kapitel 8 diskutierten bisherigen Hagelbewertungsstudien, die als Ergebnis keine nachweisbare Wirkung durch AgJ-Beimpfung hatten, haben eines gemeinsam: Mindestens ein Datenparameter ist ungenau oder nicht vorhanden. So hatte man etwa beim berühmten schweizerischen „Großversuch IV“ Radaranlagen zur Verfügung, die eine Unterscheidung zwischen Regen und Hagel nicht ermöglichten und die detaillierte Studie von H. Höller und P. F. Meischner aus dem Jahre 1993 verwendete keine Hagelschadensdaten.

Offen geblieben ist also jedenfalls eine Untersuchung der Effizienz der Hagelabwehr, bei der alle nötigen Parameter in der nötigen Genauigkeit einfließen können. Versucht man die einzelnen Hagelbewertungsstudien in Typen zusammenzufassen, kann man von zwei grundverschiedenen Ansätzen sprechen. Einerseits die statistische Studie, wie sie etwa von O. Svabik 2004 mit der Auswertung der Hageltestplatten vorgelegt wurde, wobei hier über einen längeren Zeitraum nur Wirkungsgrundlagen[67] untersucht wurden und andererseits die phänomenologische Effizienzuntersuchung am konkreten Hagelereignisfall unter Berücksichtigung von Einfluss- und Wirkungsgrundlagen.

Die vorliegende Arbeit hat sich zum Ziel gesetzt, anhand von drei Fallbeispielen im Zeitraum 1991 bis 2002 die oben genannten Grundlagen zu vernetzen und zu überprüfen, ob ein Wirkungsnachweis der Wolkenimpfung durch AgJ durch die Steirische Hagelabwehrgenossenschaft erbracht werden kann. Die nachfolgenden Kapitel beschäftigen sich daher speziell mit der aktiven Hagelabwehr in der Steiermark, wobei in Kapitel 14 und 15 konkret die drei Fallbeispiele diskutiert werden.

[67] siehe auch Kapitel 12.2

10. Die aktive Hagelabwehr in der Steiermark

10.1. Historischer Rückblick

Wie schon in den Kapiteln 6 und 7 teilweise geschildert, soll hier ein kurzer Überblick über die Entwicklung der aktiven Hagelabwehr in der Steiermark gegeben werden.

Noch in der Zeit der britischen Besatzung, am 23.3.1955 (die Staatsvertragsunterzeichnung fand erst am 15.5.1955 statt) kam es in Graz mit Unterstützung der Steiermärkischen Landwirtschaftskammer nach Südtiroler Vorbild unter Obmann Ing. Fattinger zur Gründung der „Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft“, der die Gemeinden des zu schützenden Gebietes als Mitglieder angehörten. Zunächst wurde mittels Raketen, die eine Reichweite von ca. 1500 – 2500 m hatten, etwa 16 Gramm Silberjodid pro Rakete durch Explosion und damit Selbstvernichtung der Rakete auf einmal ausgebracht. Nachteil dieser Methode war sicherlich, dass die Hagelbildungszone, die ab ca. 4000 Meter über Grund liegt, nicht erreicht werden konnte. Wiederholt konnte man auch beobachten, dass Raketen viel zu spät abgeschossen wurden, sodass der bereits einsetzende Gewitterregen das Silberjodid nicht mehr in den Aufwindkanälen in die oberen Wolkenteile transportieren konnte. In der Steiermark wurde die erste Hagelabwehrrakete bereits im Juni 1954 abgefeuert, nach Gründung der Hagelabwehrgenossenschaft gab es im Jahr 1955 73 Abschussstellen. Im Jahre 1968 zur „Blütezeit“ gab es 613 Abschussstellen, wobei in diesem Jahr 4635 Raketen abgefeuert wurden. Die Beimpfung mittels Raketen wurde 1976 eingestellt. Die Gründe für die Einstellung der Hagelabwehr mit Silberjodidraketen waren neben den oben genannten vor allem: Kein geschlossenes Abwehrnetz, zunehmender Mangel an ausgebildeten Schützen und Unfallgefahr durch zu früh explodierende Raketen, sowie keine Genehmigung von Raketen mit größeren Steighöhen wegen Gefährdung der Zivilluftfahrt.

Im Jahre 1958 wurde zusätzlich zum Raketeneinsatz begonnen, Bodengeneratoren einzusetzen, die mittels Propangasflamme eine sechsprozentige Silberjodid-Aceton-Lösung verbrannten. Diese wurden auf exponierten Geländepunkten in mehreren Kränzen quasi halbkreisförmig parallel zum Verlauf des steirischen Randgebirges positioniert und bis 1986 betrieben. 130 Bodengeneratoren waren 1982 noch im Einsatz, wobei die Betreuer über den Beginn des „Brennerbetriebes“ über den regionalen Rundfunk informiert wurden (siehe Abb. 6.5 und 10.1). Die Bodengeneratoren mussten zumindest ein bis zwei Stunden vor dem erwarteten Gewitterbeginn aktiviert werden, die zugehörigen Prognosen lieferte der Wetter-

dienst des damaligen Bundesamtes für Zivilluftfahrt auf dem Flughafen Graz-Thalerhof. Die Effizienz dieser Methode war jedoch sehr gering, da es durch die fixen Generatorstandorte nicht möglich war, das Silberjodid Ziel gerichtet auszubringen und man auf Gewitterzugrichtung oder Aufwindströmung nicht reagieren konnte. Zum zweiten kam ein technisch-organisatorisches Problem dazu: Die Zahl der verfügbaren Betreuer, die meist als Vollerwerbslandwirte ihre Arbeits- und Wohnstätte in der Nähe der Generatoren hatten, ging aufgrund der Wandlung im Gesellschafts- und damit Berufsleben stark zurück.

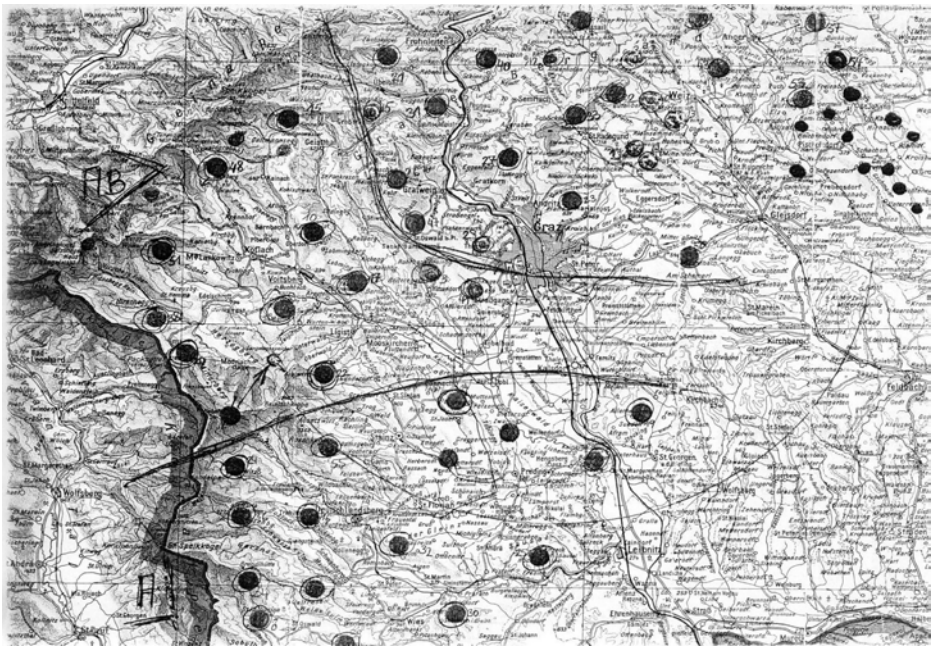


Abb. 10.1.: Karte der südlichen Steiermark. Die Punkte markieren die Standorte der Bodengeneratoren (zur Verfügung gestellt von H. Gobec)

Wurden im Jahre 1982 die ersten zwei Hagelabwehrflugzeuge noch getestet (ein Flugzeug für Graz-Weiz, ein Flugzeug für Radkersburg, wobei letzteres von der Firma „Golobwerbung“ gestellt wurde), ging man 1984 mit zwei Flugzeugen in den Regelbetrieb über. 1985 flogen im Raum Graz-Weiz bereits vier Flugzeuge, 1986 kamen für den Raum Radkersburg zwei weitere Flugzeuge dazu. Ab dem Jahr 1987 wurden die präventiven Hagelabwehreinsätze zur Gänze auf „Flugzeugbetrieb“ umgestellt.

1989 kam es zur Gründung des „Steirischen Hagelabwehrvereins“ durch Günter Hackl, Jörg Grehs und Walter Golob, im selben Jahr wurde eine Abteilung der „Golob GmbH.“ neu in „Südflug“ umbenannt. Heute existieren in der Steiermark drei Betreiber der aktiven Hagelabwehr: die Hagelabwehrgenossenschaft, die „Südflug“ und die „hail air“. Alle Betreiber setzen ausschließlich Flugzeuge zur Hagelbekämpfung ein.

10.2. Die gegenwärtigen Hagelabwehrbetreiber in der Steiermark

10.2.1. Die Firma „Südflug“

Die Firma „Südflug“ wurde im Jahr 1989 als Abteilung der Golob GmbH. mit Sitz im kärntnerischen Radenthein gegründet. Der Gründer Walter Golob war bereits 1982 am Beginn der Flugzeugeinsätze der „Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft“ dabei. Unter anderem durch Auffassungsunterschiede hinsichtlich der operationellen Vorgehensweise bei Hagelabwehreinsätzen kam es im Jahr 1988 zur Trennung von Golob und der Hagelabwehrgenossenschaft. Golob lehnte beispielsweise den Einsatz von Fackeln beim Seedingeinsatz ab und forcierte das so genannte „Vorstreuen“, wie er es nannte. Dabei geht es um die Ausbringung von AgJ mittels am Flugzeug montierter Brenner relativ weit vor der zu erwarteten Gewitterzugbahn, sodass das AgJ von einer halben bis zu einer Stunde vor dem eigentlichen Gewitterereignis bereits in der Luft wäre. Bis zum Jahr 1995 betreute die „Südflug“ für den „Steirischen Hagelabwehrverein“ von Günter Hackl den Westen und den Südosten der Steiermark, bis es im Juni 1995 zu einem tragischen Unfall kam. Günter Hackl stürzte mit einem aus den USA angekauften Düsenflugzeug „Fuoga Magister“ bei einem Testflug Nähe Marburg (Slowenien) ab und verunglückte tödlich. Hackls Verträge wurden von Golob übernommen und der Betrieb weitergeführt. Mit der Hagelabwehrgenossenschaft einigte man sich darauf, dass die Gemeinden südlich der Südautobahn von der Südflug betreut werden sollten, jene nördlich der Südautobahn von der „Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft“. Bis 1998 stand der Südflug ein Wetterradar im weststeirischen Frauental zur Verfügung, welches von J. Daum betrieben wurde und ab 1999 nunmehr von der neu gegründeten „hail air“ verwendet wurde. Bereits seit 1988 werden von der Südflug GPS-Geräte[68] verwendet, die die exakte Positionsbestimmung der Flugzeuge während des Einsatzes ermöglichen. Die Hagelabwehrgenossenschaft hatte solche GPS-Empfänger erst im Jahre 2000 und hier mit bescheidenem Erfolg in Verwendung. Heute steht der Südflug über Internet die Radarinformation der Wetterradars der Austrocontrol zur Verfügung, wobei vor allem Zirbitzkogel und Schwechat für das Einsatzgebiet von Relevanz sind. Die Piloten haben die Radarbilder mittels Laptop während des Einsatzes an Bord. Seit 1998 werden von der Südflug keine Fackeln[69] mehr eingesetzt, dafür mit eigens entwickelten Brennern eine 3-7%ige Silberjodid-

[68] GPS: Global Positioning System, von den USA betriebenes Satellitenortungssystem
[69] Vergleiche Kapitel 11.1.

Aceton-Lösung verwendet, die durch eine 1-2%ige Natriumjodid-Lösung als Katalysator ergänzt wird. Der Ausströmdruck kann zwischen 1 und 3 atü variiert werden, wobei die Acetonlösung mit Stickstoff aus dem Brenner gepresst und zerstäubt und durch einen elektrischen Funken außen gezündet wird, sodass das AgJ als Aerosol in die Luft gelangen kann. Derzeit sind vier Flugzeuge für die Firma „Südflug“ im Einsatz: eine Cessna 182 mit 50l-Tank für die AgJ-Acetonlösung und einer Einsatzzeit von 4 Stunden, eine zweimotorige Partenavia BN 68 mit 100l-Tank und 7 Stunden Flugzeit, eine Cessna 150 mit 50l-Tank und Treibstoff für 4 Stunden Flugzeit sowie eine zweimotorige Cessna 414 mit 100l-Tank und 4-6 Stunden Flugzeit. Als einziger Hagelabwehrbetreiber in der Steiermark führt die „Südflug“ auch Nachtbefliegungen durch. Stationiert ist die „Südflug“ am Flughafen Graz-Thalerhof und betreut heute vor allem Gemeinden in den Bezirken Leibnitz, Feldbach, Deutschlandsberg und Radkersburg.

10.2.2. Die „hail air“ Hagelabwehr Ges.m.b.H.

Im Herbst 1999 wurde von Josef Harrer die nunmehr dritte Hagelabwehrorganisation etabliert (offizielle Gründung 1997), die „hail air Hagelabwehr Ges.m.b.H.“. Die ehemals dem Steirischen Hagelabwehrverein bzw. der Südflug zur Verfügung stehende Radaranlage von Josef Daum wurde von Harrer mit übernommen. Die Firmenzentrale wurde in Pichling bei Söding (Weststeiermark) eingerichtet, Josef Daums Radaranlage wurde von Frauental nach Söding verlegt. Harrer, der ebenfalls vom Flughafen Graz-Thalerhof aus operiert, zählt einige weststeirische Gemeinden wie Deutschlandsberg, Söding, Maria Lankowitz und Köflach zu seinen Kunden. Das Forschungs-Wetterradar der Joanneum Research auf der Hilmwarte, das 1986 installiert wurde, unterstützt die „hail air“. Die Messung erfolgt in zwei aufeinander senkrecht stehenden Polarisationsebenen.[70] Seit einigen Jahren arbeitet Harrer mit dem französischen Hagelexperten J. F. Berthoumieu zusammen, der aus Frankreich eine neue Technologie in die Weststeiermark mitgebracht hat: Harrer setzt neben Silberjodid als Impfsubstanz auch Natriumchlorid (Kochsalz) ein. Dieses soll durch seine hygroskopische Wirkung als Kondensationskern niederschlagsauslösend an der Wolkenbasis wirken[71] und nicht als Gefrierkern in oberen Wolkenschichten, wie das AgJ. Wirksamkeitsstudien zur

[70] Näheres zur Radartechnologie siehe Kapitel 12.1.3.

[71] in den USA wird diese Technologie der induzierten Niederschlagsauslösung immer häufiger von den so genannten „Regenmachern“ in Trockengebieten verwendet, nachdem man in den 1980er Jahren die Wirkung im Bereich von Fabriksschloten in Südafrika beobachten konnte. Die Abgasteilchen wirkten als hygroskopische Kondensationskerne und riefen in der Nähe der Schlote Regenwolken hervor.

Wirkung der NaCl-Fackeln wurden für die Steiermark bislang noch nicht veröffentlicht. Harrer setzt AgJ-Brenner, AgJ-Fackeln und NaCl-Fackeln ein. Diese sind an zwei Flugzeugen der Typen „Cessna C 182R“ mit der Kennung OE-DON und „Cessna C 182Q“ mit der Kennung OE-DOR montiert. Die Brenner entwickelt die „hail air“ gemeinsam mit den Firmen Thalhammer (Lieboch) und AAC-Werftbetrieb (Flughafen Graz).

Abb. 10.2.: Einsatzflugzeug der „hail air“ mit Brenner, AgJ-Fackeln (unten) und NaCl-Fackeln (oben), entnommen der hail-air-Homepage am 21.8.2005.

10.2.3. Die Steirische Hagelabwehrgenossenschaft

Die „Steirische Hagelabwehrgenossenschaft“, im Folgenden nur noch „Genossenschaft“ genannt, ist jener Betreiber aktiver Hagelabwehr, mit dem die Tätigkeit der aktiven Hagelabwehr im Jahre 1955 begann. Die geschichtliche Entwicklung wurde bereits in Kapitel 10.1. dargelegt. Heute setzt die Genossenschaft drei Flugzeuge ein, wobei auf die technische Ausrüstung in Kapitel 11.1 genauer eingegangen wird. Die Genossenschaft hat sich von Anfang an auch um wissenschaftliche Betreuung ihrer Tätigkeit bemüht. Im Jahre 1981 beauftragte das „Gremium zur Beratung von Abwehrmaßnahmen gegen Hagel“ über Antrag der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) mit der Leitung des vom Meteorologen und Hagelexperten Dr. Otto Svabik ausgearbeiteten Hageltestplattenprojektes in der Steiermark[72]. Dabei wurde ein aus 181 Hageltestplatten-Stationen bestehendes Messnetz auf einem Areal im Raum Feldbach aufgebaut, wobei die vom Hagel getroffenen Platten von der ZAMG regelmäßig ausgewertet wurden (Lorber, Domittner, 2005). Anlässlich des 50-Jahr-Jubiläums der Genossenschaft hat

[72] Genaueres siehe Kapitel 12.2.2.

Otto Svabik seinen Bericht über die Auswertung der Hageltestplatten im Zeitraum 1982-2001 vorgelegt. Auf die Ergebnisse dieses Berichtes wird in Kapitel 12.2.2. noch genauer eingegangen. Ein zweites wissenschaftliches Projekt war die Entwicklung von Computerprogrammen, die der Analyse von Hagelereignissen dienen sollten, also durch nachträgliche wissenschaftliche Auswertung künftige operationelle Tätigkeiten der Hagelabwehr optimieren sollten. Diese insgesamt drei Programme stellten Einfluss- und Wirkungsgrundlagen gegenüber und wurden in den Jahren 1992 bis 2000 in Zusammenarbeit mit der TU Graz entwickelt.[73] Die Entwicklung dieser Programme erfolgte 1994 unter Mitarbeit des Autors dieser Arbeit, die in Kapitel 14 vorgestellten Fallbeispiele werden nach oben genannten Grundlagengegenüberstellungen abgehandelt. Als dritte Säule technologisch-wissenschaftlicher Weiterentwicklung sei die Installation des neuen Wetterradars auf der Reicherhöhe erwähnt, das seit dem Jahre 2003 in Probebetrieb ist und in Kapitel 12.1.3. genauer vorgestellt wird.

Heute umfasst das Hagelabwehreinsatzgebiet rund 2000 km² mit insgesamt 100 zahlenden Mitgliedsgemeinden der Bezirke Voitsberg, Graz, Graz-Umgebung, Weiz, Hartberg und Fürstenfeld.[74] Die Flugzeuge starten vom Flugplatz Unterfladnitz bei Weiz, wo sich auch die Einsatzleitung befindet. Die Finanzierung der Hagelabwehr erfolgt seit 1995 ohne Unterstützung der steiermärkischen Landesregierung ausschließlich durch Beiträge der Einsatzgemeinden.[75] Die Höhe der Beiträge ergibt sich aus einem eigens entwickelten Punktesystem, in dem Sonderkulturen höher als Ackerland bewertet werden, die Einwohnerzahl der Gemeinden, sowie Wiesen-, Wald- und extensive Kulturen berücksichtigt werden. Dieses Punktesystem soll ab der Saison 2006 neu gestaltet werden, um die in den letzten Jahren stark zunehmenden Flächen mit Hagelnetzen weniger stark berücksichtigen zu können, als die Flächen ohne Netze. Somit soll das System an die aktuelle Situation angepasst werden. Im Jahr 2004 hatte die Hagelabwehrgenossenschaft 312.000 € an Betriebseinnahmen und 307.000 € an Betriebsaufwendungen zu verzeichnen.

[73] Genaueres in Kapitel 13.

[74] Eine Karte der Einsatzgemeinden bzw. eine Liste derselben befindet sich im Anhang

[75] Im Jahre 1987 stellte das Land Steiermark noch 800 000 Schilling Förderung zur Verfügung. Diese wurde jährlich weniger, 1994 gab es nur noch 150 000 Schilling, 1995 gar keine Förderung mehr.

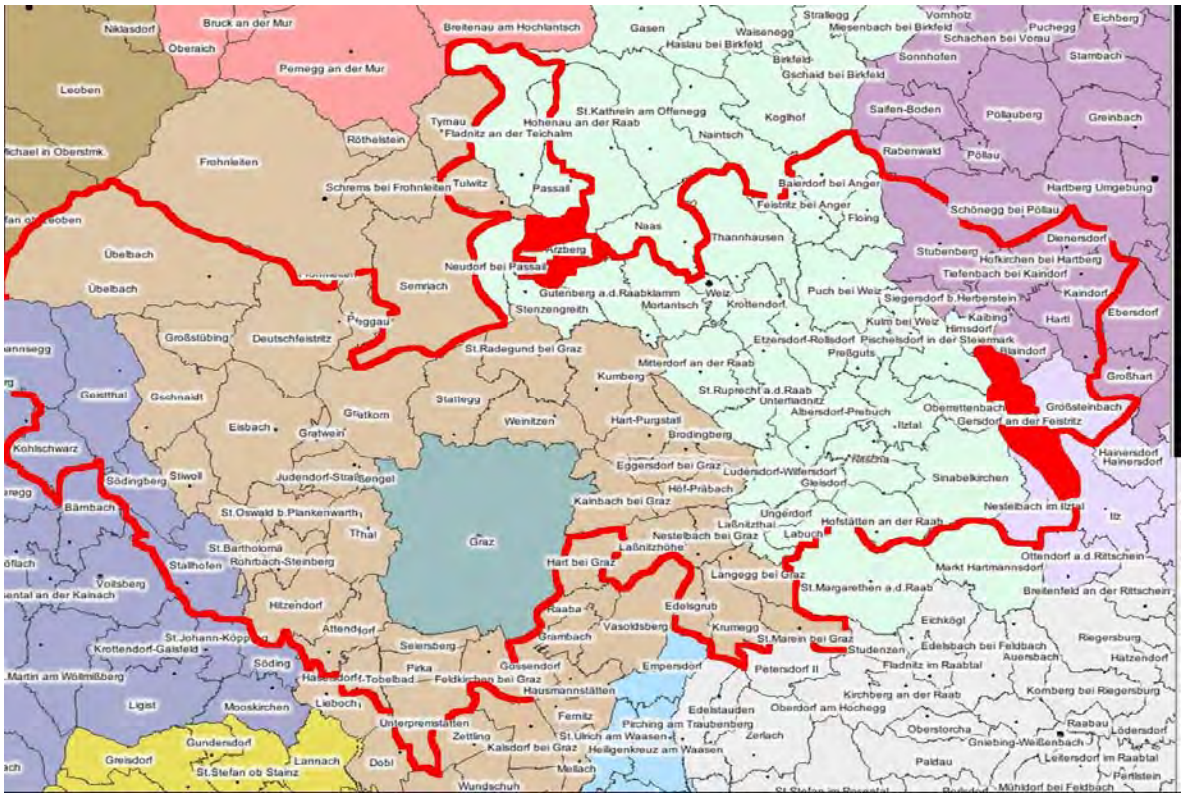


Abb. 10.3.: Karte der Mitgliedsgemeinden der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft, Stand 2005, zur Verfügung gestellt von F. Gruber

11. Operationelles Vorgehen der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft

11.1 Technische Ausrüstung

Zum Einsatz kommen drei Flugzeuge der Type „Cessna 182“ (Stand 2005) mit einer Motorleistung von 235 PS (Pferdestärke).[76] Die Flugdauer je Flugzeug beträgt 4 Stunden. Die Mindestgeschwindigkeit beträgt 120 km/h, die Höchstgeschwindigkeit 260 km/h. In den 1980er Jahren wurden alle Flugzeuge (von 1987 bis 1989 gab es sogar vier Maschinen) von der Firma „Land- und Forstflug“ gemietet.[77] 1996 wurde eine Cessna zugekauft, die beiden anderen nach wie vor angemietet.

Links und rechts ist an den Flugzeugen je ein Brenner montiert, der zur Ausbringung des Silberjodids in Aerosol-Form dient. Im Untersuchungszeitraum für diese Arbeit standen der Hagelabwehrgenossenschaft Brenner zur Verfügung, die bei einer Temperatur von etwa 900°C eine 6%ige Acetonlösung[78] verbrannten. Anfangs hatte man eine nur 2%ige Lösung zur Verfügung und es stellte sich heraus, dass der AgJ-Gehalt doch zu niedrig war. Versuche mit einer 7%igen Lösung zeigten allerdings, dass die Düsen der Brenner bereits verklebt wurden. So fand man, dass eine 6%ige Lösung den Erfordernissen am besten gerecht wurde. In den Flugzeugen sind je ein 50 bzw. 65 Liter fassender Tank montiert, wobei pro Stunde und Brenner 15 Liter Lösung verbrannt wurden. Das heißt, man verbrauchte 30 Liter pro Stunde, was dazu führte, dass die Einsatzdauer mit zwei Stunden begrenzt war. Die Zündung der Aceton-AgJ-Lösung erfolgte durch einen elektrischen Funken, wobei beim Verbrennungsvorgang dass Staudruckprinzip zur Anwendung kam. Das heißt, dass der Verbrennungsvorgang vom Wert des jeweiligen Staudrucks abhängig war, also nicht konstant war und die Verbrennung nicht immer vollständig war. Nach 15 Betriebsjahren sollten die alten Eigenbau-Brenner ersetzt werden und man beauftragte im Jahr 2001 die Grazer Firma Reinisch mit der Konstruktion eines neuen Brenners. Labortests zeigten, dass bei Verbrennungstemperaturen der Lösung von 1196°C das AgJ die beste Wirkung zeigt. Der neue Brenner lieferte genau diese Verbrennungstemperatur, außerdem konnte die aktuelle

[76] 235 PS entsprechen 173 kW (Kilowatt), wobei gilt: 1 PS = 0,736 kW

[77] In Monaten ohne Hagel werden diese Flugzeuge zur Vertreibung großer Schwärme von Staren im Burgenland eingesetzt.

[78] Azeton (Aceton), auch Dimethylketon hat die chemische Formel: CH_3-CO-CH_3

Verbrennungstemperatur jederzeit abgelesen werden. Die Temperatur wird in der Brennkammer durch eine computergesteuerte Anlage konstant gehalten, die Verbrennung findet mittels Temperatursensor vollständig statt. Ein Entweichen unverbrannter Lösung ist damit nicht mehr möglich. Mittels Zahnkranzpumpe wird ein exakter Einspritzdruck von 8 bar erzeugt, der Luftmengenregler wird vom Temperatursensor in der Brennkammer gesteuert. Das führte dazu, dass die Anzahl der Kondensationskerne um das 20 000-fache erhöht werden konnte und dass nur noch 7 Liter Acetonlösung pro Stunde und Brenner verbraucht wurden, was die Einsatzflugdauer verdoppelte. Bei ersten Tests gelang es auch bei starkem Regen, die Brenner zu zünden und die Flamme aufrecht zu erhalten. (Lorber, Domittner, 2005). Seit der Saison 2002 wurde auf einem Flugzeug der neue Brenner eingesetzt, ab der Saison 2006 sollen alle Flugzeuge mit den neuen Brennern ausgerüstet werden. Im Durchschnitt der letzten Jahre wurden etwa 2000 Liter pro Jahr an Acetonlösung verbrannt und ausgebracht. Der Preis für die neuen Brenner liegt etwa bei 11.000 € pro Stück, der Preis für 1 Liter AgJ-Lösung liegt bei etwa 30 €.

Neben den Brennern haben die Hagelabwehrflugzeuge auch noch Fackeln an Bord (je 10 Stück pro Flugzeug, an jeder Flanke je fünf Stück). In diesen Fackeln, die vom Jahr 2000 – 2003 aus Kroatien und seit 2004 (auch wegen wegfallender Zölle) aus Slowenien bezogen werden, ist das Silberjodid in kristalliner Pulverform vorhanden, wobei dieses durch eine Glimmzündung ausgebracht wird. Pro Fackel werden etwa 12 Gramm AgJ verbrannt, wobei die Brenndauer etwa 6 Minuten beträgt. Vor dem Jahr 2000 lieferte die österreichische Firma Pinto derartige Fackeln, wobei die Zündung durch eine Schwarzpulverexplosion erfolgte, die Fackeln einen dreimal größeren Durchmesser hatten und deutlich teurer waren.[79] Fackeln werden dann zusätzlich zu den Brennern aktiviert, wenn die Einsatzleitung Wolken am Radarschirm ausmacht, die besonders hohe Hagelwahrscheinlichkeit erwarten lassen. Im Durchschnitt der letzten Jahre wurden etwa 80 Fackeln pro Jahr von der Hagelabwehrgenossenschaft eingesetzt, wobei je nach Saison die Anzahl zwischen 50 und 100 Stück schwankt. Der Preis pro Fackel beträgt etwa 80 €.

Brenner und Fackeln sind also jene Instrumente, die unmittelbar im Einsatz die Schadhagelgefahr minimieren sollen. Natürlich sind im Einsatzablauf, der in Kapitel 11.2. geschildert

[79] Technische Daten der heute eingesetzten Fackeln (je Fackel): 0,1 g Schwarzpulver, 150g Reagenz „Pyromischung“ (davon 8% AgJ), Brenndauer 4-6 Minuten; Eiskerne pro Gramm Reagenz: bei –6°C 1,5 x 10^{12}, bei –10°C 1,7 x 10^{13}, die Aktivitätsschwelle des Reagenz liegt bei –3,2°C. Das Reagenz besteht u.a. aus Phenolformaldehyd-Harz, Ammoniumjodid und Oxidantien

wird, auch andere technische Systeme zur Einsatzunterstützung von großer Bedeutung. Das für den Einsatzablauf unerlässliche Wetterradar wird in Kapitel 12.1.3. genauer diskutiert.

Abb. 11.1.: Von links nach rechts: Brenner, Brenner und Fackeln, Tank für die AgJ-Aceton-Lösung eines Flugzeuges der Hagelabwehrgenossenschaft (aufgenommen am 20.8.2001)

Mitte der 1990er Jahre wurde ein System getestet, dass die Positionsbestimmung der Piloten für nachträgliche Hagelanalysten optimieren sollte, dass amerikanische Ortungssystem „GPS“.[80] Die GPS-Empfänger waren aber sehr fehlerhaft ein dauerhafter Einsatz konnte nicht ermöglicht werden. Auch für die vorliegende Arbeit standen keine GPS-Daten zur Verfügung.

11.2. Ablauf von Einsätzen

Pro Jahr sind in den Monaten Mai bis September im Durchschnitt 30 bis 40 Einsatztage für die Steirische Hagelabwehrgenossenschaft zu verzeichnen, wobei man pro Einsatztag im Schnitt auf 2-3 Einsätze kommt (vergleiche Kapitel 2, Tab. 2.1).

Die Einsatzleitung wurde am Flugplatz Unterfladnitz bei Weiz (ca. 20 km nordöstlich von Graz) eingerichtet. Das Einsatzgebiet umfasst heute rund 2300 km² im Vorfeld des eigentlichen Schutzgebietes, mit dem Schwerpunkt bei der nordwestlich vorgelagerten Gleinalpe, der nördlich gelegenen Fischbacher Alpe, dem Grazer Bergland und den nördlichen Teilen der westlich gelegenen Koralpe (Lorber, Domittner, 2005).

[80] GPS = „Global Positioning System“: Ist ein amerikanisches Ortungs- und Navigationssystem für den militärischen und zivilen Bereich, dass über die Laufzeitunterschiede elektromagnetischer Signale von mehreren Satelliten zum zu ortenden Objekt dessen Position auf wenige Zehnermeter genau angeben kann. Das US-Militär verhindert durch Störsignale noch genauere Ortungspräzision durch Störsignale.

Ab Mai jedes Jahres wird die Hagelabwehr üblicherweise operationell tätig. Die Angaben über Wetterlage sowie Wetterprognosen werden vom Flugwetterdienst am Flughafen Graz-Thalerhof eingeholt. Zusätzlich und besonders für die Hagelabwehr wichtig sind Angaben des Windes im 850 hPa- und im 500 hPa-Niveau[81], die Höhe der „Null-Grad-Zone", die berechnete Auslösetemperatur (des Hagels), sowie die Gewitter- und Hagelwahrscheinlichkeit. Besonders wichtig sind die Meldungen der Wetterbeobachter der mittlerweile nur noch zwei (ehemals 15) Bodenstationen, die an exponierten Stellen an der Peripherie des Hageleinsatzgebietes eingerichtet wurden (heute: Reicherhöhe und Hitzendorf). Die Damen und Herren melden aufgrund ihrer Wahrnehmungen des sich veränderten Wolkenbildes das Einsetzen der Konvektion, sowie die Zugrichtung der Gewitterzellen und sind neben dem Wetterradar von ganz entscheidender Bedeutung für die genaue Bestimmung der Flugroute der Einsatzflugzeuge. Der Wetterradarschirm wird vom Einsatzleiter (meist Geschäftsführer der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft Franz Gruber) aufmerksam beobachtet und die dort ablesbaren Zugrichtungen der Gewitterzellen festgestellt bzw. deren Intensität und damit Hagelträchtigkeit abgeschätzt.[82] Danach entscheidet der Einsatzleiter, ob ein Flugzeug wann aufsteigen soll und wohin es fliegen soll. Vor Ort entscheidet der Pilot gemeinsam mit der Einsatzleitung die Wahl der Methode (Brennereinsatz, Fackeleinsatz), wobei zwei grundlegend unterschiedliche Gewittertypen beflogen werden. Bei Frontgewittern fliegt das Flugzeug vor der Böenwalze hin und her und bringt so in die Aufwindzone das Silberjodid ein, bei lokalen Vertikalentwicklungen fliegt das Einsatzflugzeug unterhalb des Wolkenturmes ringförmig und bringt so das AgJ in den Aufwindschlot. An einem Hageltag kann es bis zu 10 Einsätze geben, wobei durchaus mehrere Flugzeuge gleichzeitig in der Luft sein können, vor allem wenn sich die Gewitterzellen an unterschiedlichen Orten entwickeln[83]. Ist die maximale Flugdauer erreicht oder gibt der Einsatzleiter aufgrund fehlender Hagelbedrohung laut Radarbild Entwarnung, drehen die Flugzeuge ab und kehren zum Flugplatz Unterfladnitz zurück. Im Durchschnitt sind pro Einsatztag zwei Flugzeugeinsätze zu verzeichnen.

Um nachträglich den operativen Ablauf eines Hagelabwehreinsatzes dokumentieren zu können, werden von den Piloten so genannte „Seeding-Reports"[84] angelegt, die die wichtigsten Angaben zum Flugzeugeinsatz enthalten (z.B. Ort der ausgebrachten Impfsubstanz,

---

[81] hPa = Hektopascal: Einheit des Luftdrucks, entspricht der Angabe in Millibar; 1Pa = 1N (Newton) pro m²

[82] Genaueres zum Wetterradar siehe Kapitel 12.1.3.

[83] Fallbeispiel 1 (Kapitel 14.2.1) war ein Ereignis, im Zuge dessen 7 Einsätze geflogen wurden

[84] „Seeding" (engl.): Säen

Windstärke etc.).[85] Anhand der Seeding-Reports können die am häufigsten beflogenen Regionen und damit auch die Schwerpunkte der Gewittertätigkeit in Abhängigkeit von der Wetterlage abgeleitet werden. In Kapitel 12.2. werden so genannte Wirkungsgrundlagen vorgestellt, die die Auswirkungen eines erfolgten Hagelereignisses dokumentieren sollen. So stehen der Genossenschaft zur Auswertung Hagelmeldungen von 364 Gemeinden innerhalb und außerhalb des Schutzgebietes zur Verfügung. Diese Meldungen decken etwa das 6850 km² große Einzugsgebiet des Wetterradars am Zirbitzkogel (2400 m Seehöhe, liegt 70 km westlich von Graz) ab. Seit dem Jahre 1991 steht dieses Wetterradar zur Verfügung, das im Schnitt alle 10 Minuten ein Bild liefert. Die in dieser Arbeit diskutierten Fallbeispiele stützen sich auf Daten des Wetterradars vom Zirbitzkogel bzw. auf Daten des Wetterradars von Schwechat bei Wien. Seit dem Jahr 2004 betreibt die Hagelabwehrgenossenschaft ein eigenes Wetterradar auf der Reicherhöhe, welches in Kapitel 12.1.3.3 kurz diskutiert wird. Zur nachträglichen Auswertung wurden auch neben den Gemeindehagelmeldungskarten auch solche für die Hageltestplattenstationen ausgegeben, wobei das HTP-Programm in Kapitel 12.2.3. genauer diskutiert wird. Die entwickelten Computerprogramme, die Eingangs- und Wirkungsgrundlagen vernetzten[86] sowie weitere Arbeiten zur Gewitter- und Hageltätigkeit in der südöstlichen Steiermark komplettieren das Bemühen der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft um wissenschaftliche Begleitung und Aufarbeitung der Hagelereignisse und deren Beeinflussung.

[85] Der Aufbau eines Seeding-Reports wird in Kapitel 12.1.5. genauer besprochen.
[86] siehe Kapitel 13.

12. Für die Messung und Datenanalyse wesentliche Aspekte und bisherige Ergebnisse

Im Folgenden werden Einfluss- und Wirkungsgrundlagen einander gegenübergestellt, die für eine Beurteilung und Analyse eines Hagelabwehreinsatzes inklusive Schadhagelerhebung unerlässlich sind.

12.1. Einflussgrundlagen

Einflussgrundlagen sind Aspekte, die vor bzw. während eines Hagelereignisses sowie eines Hagelabwehreinsatzes zu berücksichtigen sind. Nachstehend werden jene Grundlagen angeführt, die für eine umfassende Beurteilung, wie Sie in dieser Arbeit für drei Fallbeispiele durchgeführt wurde, wesentlich sind.

12.1.1. Satellitenbilder

Satellitenbilder dienen der Beurteilung des momentanen Zustandes der Atmosphäre sowie bei Verwendung einer bewegten Darstellung mehrerer Bilder über einen Zeitraum von einigen Stunden oder Tagen zur Unterstützung einer Wetterprognose. Die für die Hagelabwehr relevanten Wettersatelliten fliegen auf äquatorialer Bahn und sind geostationär, das heißt sie befinden sich immer über demselben Punkt der Erdoberfläche. Daher haben sie dieselbe Umlaufzeit wie die Erde selbst und eine Flughöhe von etwa 36 000 Kilometer[87]. Durch das Einsetzen verschiedener Bandbreiten des elektromagnetischen Spektrums bei den an Bord befindlichen radiometrischen Kamerasystemen, sind nicht nur Darstellungen im Bereich des sichtbaren Lichtes möglich (VIS = „visible“, Wellenlänge 400 – 700 nm), sondern auch die im höheren Wellenlängenbereich liegenden Infrarot-Aufnahmen (IR). Dabei wird von den Satellitenradiometern das von der Erde und den Wolken reflektierte Sonnenlicht gemessen, wobei für die ankommende Energie im sichtbaren Bereich das Reflexionsvermögen der Stoffe entscheidend ist, das für Wolken und Schnee mit etwa 0,75 am höchsten ist, für

[87] Es gibt neben den geostationären Satelliten noch einen zweiten Typ, die „polarumlaufenden“ Wettersatelliten. Diese bewegen sich auf nahezu kreisförmigen Umlaufbahnen in etwa 800 – 1500 km Höhe, die nahe am Nord- und Südpol vorbeiführen. Unter dieser Bahn dreht sich die Erde weg, sodass die Erde streifenweise „gescannt“ wird und im zeitlichen Nacheinander die Wetterbeobachtungen von der ganzen Erde verfügbar sind. Jedes Gebiet wird innerhalb von 24 Stunden vom Satelliten zweimal erfasst, einmal am Tag und einmal bei Nacht.

Wasserflächen mit 0,05 am geringsten (Malberg, 1997). Die von der Erdoberfläche, den Wolken und der Atmosphäre ausgehende langwellige Strahlung wird von IR-Radiometern erfasst, wobei diese Wärmestrahlung von der Temperatur der strahlenden Körper abhängig ist. Man hat also bei IR-Aufnahmen zusätzlich zu den je nach Reflexionsgrad unterschiedlichen Farben (bei Falschfarbendarstellungen) oder Grautönen noch die Information über die Temperaturverhältnisse an der Erdoberfläche und der Wolkenobergrenze. Für Europa ist der Satellit METEOSAT von Bedeutung, der nahe der afrikanischen Küste über dem Golf von Guinea beim Nullmeridian steht (Malberg, 1997). Satellitenbilder können über die Flugwetterdienste, die ZAMG, die Austro Control (ehemals Bundesamt für Zivilluftfahrt) sowie von zahlreichen Internetseiten bezogen werden.

Abb. 12.1.: Satellitenbild von Österreich, die südliche Steiermark ist mit Wolken bedeckt. NOAA/DLR Überflug[88] vom 3.8.2000, 15:13 UTC, Kanäle 1+2, zur Verfügung gestellt von der ZAMG-Regionalstelle Graz-Thalerhof

12.1.2. Wetterlagenberichte

Die Steirische Hagelabwehrgenossenschaft bezieht die Wetterberichte vom Flugwetterdienst Graz - Thalerhof (Austro Control) beziehungsweise von der ZAMG -Regionalstelle am Flughafen Graz - Thalerhof. Wichtig sind dabei die zu erwartenden Luftmassenbewegungen,

[88] amerikanische NOAA-Satelliten (National Oceanic & Atmospheric Administration) sind polumlaufend, das DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) bearbeitet die Bilder, Kanal 1: Wellenlänge 580 – 680 nm, Kanal 2: Wellenlänge 725-1000 nm.

Druck- und Windverhältnisse sowie Temperaturwerte. Nachstehend eine Beispiel für eine Wetterprognose:

```
FPOS55 LOYG 290600
ZAMG, Regionalstelle fuer die Steiermark, Wetterdienst Graz.
WETTERBERICHT FÜR DIE STEIERMARK vom Sonntag,
29. Juli 2001, 0800 Uhr
Wetterlage:
Bei flacher Druckverteilung wirkt in der Steiermark schwacher
Hochdruckeinfluß.
Heute Sonntag:
Nach einem recht sonnigen Vormittag entstehen am Nachmittag vor
allem über dem Bergland einzelne Wärmegewitter. Sie ziehen dann am
späteren Nachmittag auch über das Hügelland des
Südens.
Tageshöchsttemperatur 27 bis 31 Grad.

Morgen Montag:
Am Vormittag noch Restwolken nächtlicher Gewitter. Im Laufe des
Tages Besserung zu sonnigem und warmem Sommerwetter.
Schwül.

Frühtemperaturwerte 14 bis 17 Grad, Tageshöchstwerte um  28 Grad.
```

12.1.3. Wetterradar

Ein kurzer historischer Rückblick auf die Radarmeteorologie zeigt, dass nach zunächst militärischer Nutzung (Flugzeugerkennung) im Zweiten Weltkrieg, bereits 1941 die erste Verfolgung einer Schauerzelle durchgeführt wurde. In den Jahren 1944-1950 konnten Informationen über Entstehungsort, Form und Geschwindigkeit von Wolken bezogen werden. 1950-1960 gab es die ersten quantitativen Untersuchungen wie zur Z-R-Beziehung[89], zu Tropfenspektren und zu Rückstreueigenschaften. Ab 1960 gab es die ersten „Dopplerradars“[90], mit denen man auch Richtung und Geschwindigkeit der Teilchen in der Wolke bestimmen konnte. Moderne Radaranlagen mit unterschiedlicher Polarisation[91] helfen bei der Unterscheidung zwischen flüssiger und fester „Hydrometeore“, wobei auch die Größenspektren erfasst werden können[92]. In den USA gibt es das in vorigen Kapiteln schon

[89] wird weiter unten erläutert

[90] nach dem österreichischen Physiker Christian Doppler benannt, der den auch beim Radar wichtigen Doppler-Effekt formuliert hat, nachdem sich bei Annäherung von Beobachter (Objekt) und Strahlenquelle die Frequenz erhöht, bei Entfernung verringert.

[91] Werden Wellenzüge polarisiert, so werden diese in eine Schwingungsebene gezwungen.

[92] Das Forschungswetterradar des Joanneum Research an der Hilmwarte in Graz ist ein mehrparametriges Radar, dass die Messungen in zwei aufeinander senkrecht stehenden Polarisationsebenen durchführen kann und sich dadurch von den Großraumwetterradars der Austro Control unterscheidet.

erwähnte System TITAN, mit dem man Wolken und deren Dynamik dreidimensional darstellen kann.

Das Wetterradar ist heute eines der wichtigsten Instrumente für die operative Tätigkeit der Hagelabwehr. Flächendeckend stand für Österreich ein System von vier Großraumradarstationen, die von der Austro Control (ehemals Bundesamt für Zivilluftfahrt) betrieben werden, zur Verfügung. Für die Steirische Hagelabwehrgenossenschaft war das Radar am Zirbitzkogel und jenes in Schwechat von Bedeutung. Seit 2004 hat die Genossenschaft auf der Reicherhöhe ein eigenes Wetterradar in Betrieb. In den folgenden Kapiteln wird zunächst auf das Funktionsprinzip der vier großen österreichischen Wetterradars eingegangen, da diese Radaranlagen für den Untersuchungszeitraum relevant waren. Danach wird die Interpretation des Radarbildes erläutert; das neue Radar auf der Reicherhöhe wird anschließend kurz vorgestellt.

12.1.3.1. Funktionsprinzip der österreichischen Wetterradars

In Österreich sind vier große Wetterradars[93] in Betrieb: In Innsbruck am Patscherkofel, in Feldkirchen bei Salzburg, in Schwechat und am Zirbitzkogel in der Steiermark. Letztere zwei haben für die Hagelabwehrbetreiber in der Steiermark große Bedeutung.

Die technischen Daten der österreichischen Wetterradars (aus Köck, 1999):

- Sendeleistung: 250 kW Spitze
- Antennendurchmesser: 4 m
- Keulenbreite der Antenne: 1°
- Instrumentierte Reichweite: 220 km
- Frequenz: C-Band, 5,3 GHz
- Zeitintervall zwischen 2 Volumsscans: 10 Minuten[94]
- Anzahl der Elevationen pro Volumsscan: 22
- Verfügbare Produkte: Volumsinformationen von Intensität, radialer Geschwindigkeit, spektraler Breite des Echos, Dekorrelationszeit[95]

[93] RADAR = **Ra**dio **D**etection **a**nd **R**anging

[94] seit 2001 ist das Intervall zwischen zwei Volumsscans nur noch 5 Minuten. Für die Hagelabwehr bleibt aufgrund einer zu niedrig dimensionierten Datenleitung dennoch nur die Verfügbarkeit alle 10 Minuten bestehen.

[95] Erläuterungen der Begriffe siehe unten.

Diese technischen Angaben beziehen sich auf die Radarstationen Ende 1998. Inzwischen wurde das Zeitintervall auf 5 Minuten zwischen zwei Volumsscans verringert.

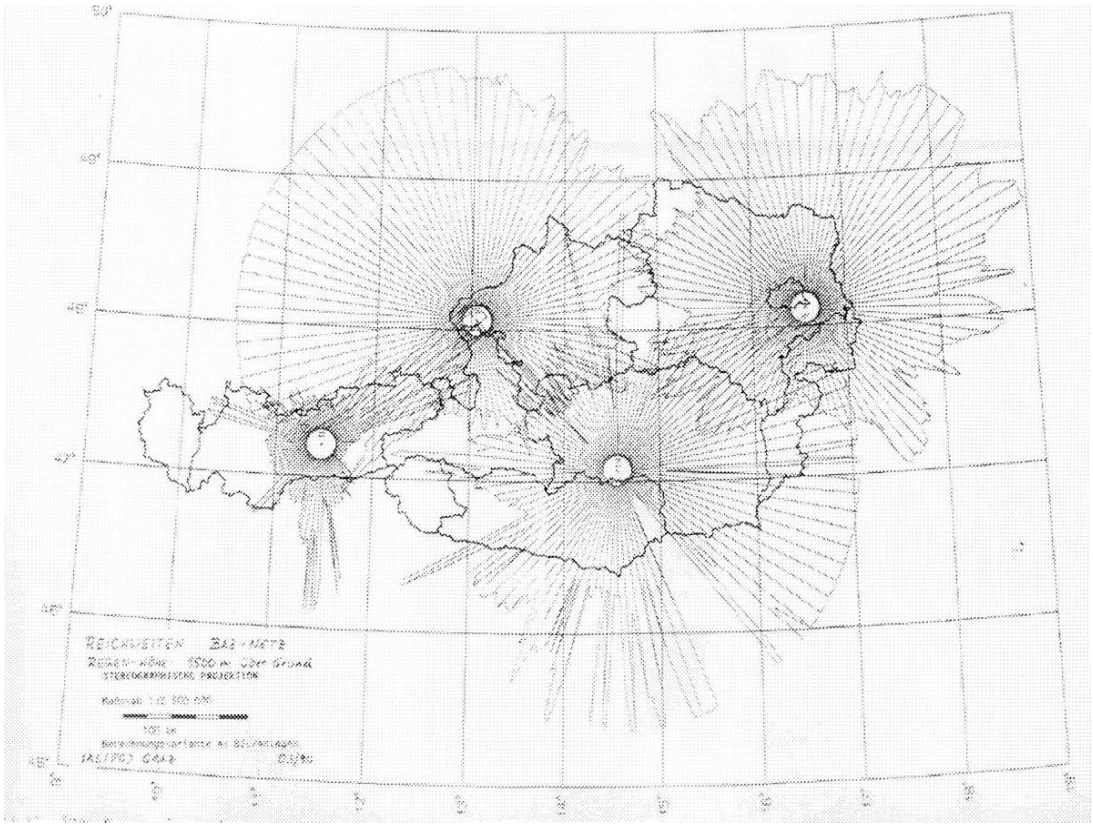


Abb. 12.2.: Abschattungsdiagramm für die 4 Wetterradars der Austro Control (von links nach rechts: Innsbruck, Salzburg, Zirbitzkogel, Schwechat), sichtbarer Bereich für Regenzellen, die eine Höhe von mindestens 1500 Meter über Grund erreichen, aus: Köck, 1999

Für die Hagelabwehrgenossenschaft standen die Radaranlagen seit 1991 zur Verfügung. Damals war allerdings das Zeitintervall zwischen zwei Scans noch 10 - 15 Minuten und die Größe der Radarpixel bei 4 mal 4 Kilometer. Diese Größen wurden später auf 2 mal 2 km verkleinert. In den Jahren 1997 und 1998 wurden die Wetterradars von einer zunächst nur 2-dimensionalen Darstellung – es gab nur Maximalwertprojektionen der Reflektivität („*Maximum Intensity Product*“) – auf 3-dimensionale Volumsdaten umgerüstet, wobei auch die Auflösung auf 2 mal 2 Kilometer pro Radarpixel verbessert wurde. Diese wurde im August 1998 (also rechtzeitig für die Hagelsaison 1999) auf 1 mal 1 Kilometer pro Pixel verbessert. Die ursprüngliche 8–teilige Intensitätsskala wurde ab der Saison 1999 zu einer 14–teiligen Intensitätsskala verfeinert[96].

[96] Dazu mehr in Kapitel 12.1.3.2. (Interpretation der Radarbilder)

Zu oben erwähnten „verfügbaren Produkten“ sei folgendes ergänzt: Zusätzlich zur Intensität kann die Reflektivität[97] gemessen werden, die spektrale Breite des Echos nimmt mit zunehmenden Luftturbulenzen zu, die Radialgeschwindigkeit ist die Geschwindigkeit der elektromagnetischen Radarwellen vom Radarstandort zum abgetasteten Regentropfen und von diesem zurück (Echo). Die Dekorrelationszeit ist ein Maß dafür, wie lange die Integrationszeit der Anlage für die Radarpulse dauert, wobei ein „scharfes“ Echo schneller als etwa ein Echo von Schneefall korreliert.

Die Betreuung und Verbesserung der Wetterradaranlagen der Austro Control wird von K. Köck von der TU Graz bzw. Joanneum Research und seinem Team durchgeführt. Am Institut für Nachrichtentechnik und Wellenausbreitung der TU Graz wurden auch jene drei Diplomarbeiten vergeben, die die Entwicklung von Hagelbewertungsprogrammen und deren Weiterentwicklung zum Inhalt hatten. Diese Arbeiten werden in Kapitel 13 kurz vorgestellt.

Das Messprinzip eines Radars basiert darauf, dass Objekte durch Aussenden eines Mikrowellenimpulses und Empfangen des vom Objekt reflektierten Echos geortet werden können. Man unterscheidet Windprofiler-Radar, Wolkenradar, Lidar (misst im fernen Infrarotbereich) und eben Wetter- oder Niederschlagsradar. Letztere senden Signale im Frequenzbereich von 3 Ghz (10 cm Wellenlänge = S-Band), 5,3 GHz (5 cm Wellenlänge, C-Band) und 10 GHz (3 cm Wellenlänge, X-Band) aus. Die österreichischen Wetterradars arbeiten wie vorhin schon erwähnt im C-Band-Modus. Die grundlegenden Funktionsprinzipien eines Wetterradars seien im Folgenden kurz erwähnt. Abb. 12.3 zeigt ein stark vereinfachtes Blockschaltbild eines Wetterradars.

Das Radar empfängt pro Impuls der ausgesandten elektromagnetischen Welle zurück gestreute Leistung, aus der im Videoprozessor die so genannte Radarreflektivität Z berechnet wird. Diese folgt direkt aus der Radargleichung, auf deren Diskussion im Rahmen dieser Arbeit jedoch verzichtet wird. Eine genaue Diskussion ist der Arbeit von K. Köck (1999) zu entnehmen.

[97] die beiden Größen hängen unmittelbar zusammen und werden später noch erläutert

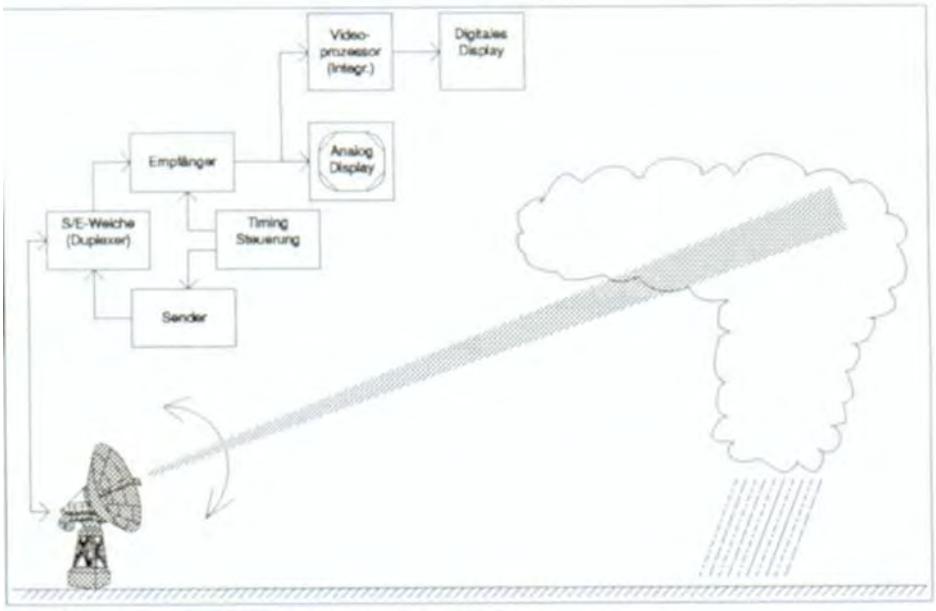


Abb. 12.3.: Wetterradarblockschaltbild, stark vereinfacht, aus: Köck, 1999

Die von einem Punktziel empfangene Echo-Leistung eines monostatischen Radars ist unter anderem auch vom Rückstreuquerschnitt abhängig, der für einen einzelnen Regentropfen (dieser ist viel kleiner als die Wellenlänge) unter anderem direkt proportional zur sechsten Potenz des Tropfendurchmessers ist und direkt proportional zum Quadrat einer Materialkonstante ist, die für Regen etwa den Wert 0,92-0,93 aufweist, für Eis (Hagel) hingegen im Bereich von 0,18 liegt. Da die Phasenlage der Echos von einzelnen Niederschlagspartikeln gleich verteilt über den bereich 0 bis 2π ist, ergibt sich der Rückstreuquerschnitt aller Partikel eines vom Radar beleuchteten Volumssegment bei Integration über eine große Zahl voneinander unabhängiger Tropfenanordnungen, als Summe aller Rückstreuquerschnitte. Diese „mittlere“ Reflektivität (siehe Formel 12-1) bildet auch die Definition des allgemein als „Radar-Reflektivität“ Z bezeichneten Maßes für die Rückstreufähigkeit des beobachteten Zielvolumens. (aus K. Köck, 1999):

$$\overline{Z} = Z = \lim_{V \to 0} \frac{\sum_V D_i^6}{V} = \lim_{V \to 0} \int_D D^6 N(D) dD \,, \qquad (12\text{-}1)$$

wobei D der Tropfendurchmesser und N die Teilchenzahl darstellen. Nimmt man an, dass die Regentropfen nicht mehr viel kleiner als die Wellenlänge sind, muss man mit numerischen Methoden den Rückstreuquerschnitt berechnen, auf dessen Angabe hier verzichtet wird. Mit diesem effektiven Durchmesser D_{eff} kann man eine „effektive Reflektivität“ Z_{eff} berechnen.

$$Z_{eff} = \lim_{V \to 0} \frac{\sum D_{eff}^6}{V} \tag{12-2}$$

Da die Radar-Reflektivität Z nun proportional der Summe der sechsten Potenz der Tropfendurchmesser ist, die Niederschlagsmenge aber proportional der Summe der dritten Potenz der Tropfendurchmesser, gibt es keinen eindeutigen Zusammenhang zwischen der Radar-Reflektivität und dem Niederschlag. Die natürliche Variabilität der Tropfengrößenverteilung ist daher eine große Fehlerquelle bei der Messung von Niederschlag mittels Radar (K. Köck, 1999). Im Jahre 1948 wurde bereits von Marshall und Palmer empirisch eine Tropfengrößenverteilung bestimmt. Berücksichtigt man diese und die Tatsache, dass der so genannte „Median-Volums-Durchmesser (typischerweise im Bereich 0,5 – 3 mm) von der Regenrate abhängig ist, ergibt sich unter Anwendung von hinreichend genau verfügbaren Beziehungen für die Fallgeschwindigkeiten von Regentropfen (K. Köck, 1999) für die Reflektivität:

$$Z = 200\ R^{1,6} \tag{12-3}$$

mit $[Z] = 1\ mm^6 / m^3$ und $[R] = mm / h$ oder Liter/ m²h. Mit R wird die Regenrate bezeichnet.

Diese Z-R-Beziehung ist eine so genannte Standard-Beziehung, die in vielen (auch den österreichischen) Wetterradaranlagen für die Umrechnung der primären Radarmessgröße Z in die Regenrate R verwendet wird. Diese Beziehung gilt allerdings nur für die Marshall-Palmer-Tropfenverteilung und liefert bei Abweichungen von derselben mehr oder weniger große Fehler.

So gibt es für unterschiedliche Niederschlagsarten verschiedene Z-R-Beziehungen. Jene für Gewitter sei hier erwähnt:

$$Z = 452\ R^{1,47} \tag{12-4}$$

bei der Interpretation der Radarbilder ist es wichtig, dass man sich der Anwendung der möglichen und teilweise naturgegeben und nicht vermeidbaren Fehlerquellen bewusst ist.

Diese sollen hier kurz aufgelistet werden:

- Fehler bei der Messung der Reflektivität Z
- Fehler bei der Umrechnung von Reflektivität Z in Regenrate R
- unvollständige Strahlfüllung
- Abschattungen durch das Gelände (gerade bei den Radars Zirbitzkogel und Schwechat häufig, dadurch „Maskierung“ von Wolkentürmen durch andere)
- Fehler aufgrund der Ausbreitungsdämpfung
- Boden-Echos („Ground Clutter“)
- Fehlen dreidimensionaler Daten (seit 1999 bei den Austro Control - Radars nicht mehr relevant)
- Fehlinterpretationen aufgrund der Schmelzzone in den Wolken und vertikaler Reflektivitätsprofile

Die genauere Diskussion dieser zahlreichen Fehlerquellen wird in Köck (1999) ausführlich durchgeführt. Die Empfehlung zur Anschaffung eines eigenen Wetterradars für die Steirische Hagelabwehrgenossenschaft ist einem Bericht von W. Randeu aus dem Jahr 1990 zu entnehmen. Demnach könne nur ein mehrparametriges, doppelt polarisiertes Radar in der Lage sein, aussagekräftig Unterscheidungen zwischen Regen und Hagel zu machen. Er zeigt dies am Beispiel des Hilmteichradars (siehe auch oben), welches inzwischen von der „hail air“ genutzt wird[98]. Seit der Saison 2004 befindet sich auch die Hagelabwehrgenossenschaft im besitz einer neuen Radaranlage, die wie schon oben erwähnt in Kapitel 12.1.3.3. vorgestellt wird.

12.1.3.2. Interpretation von Radarbildern

Eingangs sei erwähnt, dass die Arbeitsgruppe um W. Randeu und K. Köck der TU Graz die Steirische Hagelabwehrgenossenschaft bei ihren Bemühungen um Schadhagelminimierung durch umfassende Betreuung bei der Anwendung der Wetterradartechnologie seit Verfügbarkeit der Systeme in den frühen 1990er Jahren unterstützten. Dabei wurde eigens für die Hagelabwehrgenossenschaft ein Planquadratraster über die größten Teile der

[98] auch Höller und Meischner (1993) betonen in ihrer Studie ebenfalls die Bedeutung der Mehrfachpolarisation bei neuen Wetterradars, da nur die Kenntnis der differentiellen Reflektivität bzw. des linearen Depolarisationsverhältnisses auf die Beschaffenheit der „Hydrometeore“ Rückschlüsse zulässt.

Mittelsteiermark gelegt.[99] Dies diente als Hilfe für die Orientierung der Hagelpiloten, die in ihre Seeding-Reports Angaben nach Planquadrat-Vierteln vornahmen. Der Einsatzleiter konnte auf seinem Radarschirm die Wolkenformationen in dynamischer Falschfarbendarstellung verfolgen, wobei je nach Intensitätsgrad (d.h. nach Höhe der Regenrate) eine jeweils andere Farbe einer 8-teiligen Skala verwendet wurde. Ebenso waren die Grund- und Aufrissdarstellungen verfügbar, sodass man in West-Ost und Nord-Süd-Richtung den vertikalen Wolkenaufbau nach Intensitätsstufe beurteilen konnte. Wie im letzten Kapitel schon erwähnt, gibt es bei der Interpretation dieser Bilder viele Fehlerquellen, wie auch die Diskussion der Fallbeispiele in Kapitel 14 bzw. 15 noch zeigen wird. Als gute Faustregel hat sich für die Praxis das so genannte „Radarkriterium" für das Vorhandensein von Hagel in einer Hagelwolke bewährt:

„Wird unterhalb von 1500 m über der 0°-Isotherme der Wert 45 dbZ überschritten, muss mit Hagel in der Wolke gerechnet werden."

Wobei gilt: $\mathrm{dB}Z = 10 \lg Z \quad \rightarrow \quad Z = 10^{\frac{dBZ}{10}}$ (12-5)

Bei der 8-teiligen Skala entsprach dieser Wert den höchsten beiden Intensitätsstufen, bei der 14-teiligen Skala den Stufen 11-14. Sind diese Stufen auf einem Radarschirm erkennbar, gibt der Einsatzleiter den Startbefehl für die Hagelflugzeuge. Im Jahre 1999 wurde eine neue verfeinerte 14-teilige Intensitätsstufenskala eingeführt und auch die räumliche Auflösung der Radarpixel von 2 mal 2 Kilometer auf 1 mal 1 km verbessert. Dies stellte eine deutliche Verbesserung dar, da die Hagelereignisse meist räumlich sehr eng begrenzt sind. Das heißt, dass ab dem Jahre 1999 eine 1 mal 1 mal 1 Kilometer großer Atmosphärenwürfel abgetastet wurde. Gleichung 12-3 und 12-5 erlauben es, die Reflektivitätswerte Z bzw. dBZ in die Regenrate R umzurechen. Beide Angaben stehen dem Radaranalysten zur Verfügung. Nachstehend die alte 8-teilige und die neue 14-teilige Skala:

dB*Z*	0-11,8	11,8-19,5	19,5-26,7	26,7-34,2	34,2-41,8	41,8-50,2	50,2-54,3	> 54,3
***R* [mm/h]**	0-0,2	0,2-0,6	0,6-1,7	1,7-5,0	5,0-15,0	15,0-50,0	50,0-90,0	> 90,0

Tab. 12.1.: Von 1991 – 1998 verwendete 8 – teilige Intensitätsskala auf Radarbildern der vier großen österreichischen Wetterradars mit Angabe der Reflektivitätswerte und der Regenrate in Wolkensystemen.

[99] die Bezeichnung „Mittelsteiermark" ist nach dem ersten Weltkrieg in Vergessenheit geraten, da die Untersteiermark von Österreich abgetreten werden musste. Das Gebiet der ehemaligen Mittelsteiermark entspricht heute dem Raum Graz und Umgebung, der West-, Süd- und Oststeiermark.

dB*Z*	0 - 11,8	11,8 – 14,0	14,0 – 19,5	19,5 – 22,0	22,0 – 26,7	26,7 – 30,0	30,0 – 34,2	34,2 – 38,0	38,0 – 41,8	41,8 – 46,0	46,0 – 50,2	50,2 – 54,3	54,3 – 58,0	> 58,0
***R* [mm/h]**	0,04 – 0,20	0,20 – 0,27	0,27 – 0,60	0,60 – 0,86	0,86 – 1,70	1,70 – 2,73	2,73 – 5,00	5,00 – 8,65	8,65 – 14,98	14,98 – 27,34	27,34 – 49,97	49,97 – 89,89	89,89 – 153,76	> 153,76

Tab. 12.2.: Seit 1999 verwendete 14 – teilige Intensitätsskala auf Radarbildern der vier großen österreichischen Wetterradars mit Angabe der Reflektivitätswerte und der Regenrate in Wolkensystemen.

Wegen der Geländeform des Einsatzgebietes werden Radarechos unter 2000 m bildlich nicht dargestellt, d.h. in den Seitenrissen (West – Ost – Sicht und Süd – Nord – Sicht) werden die Wolkentürme erst ab einer Höhe von 2000 m graphisch erfasst. Zur weiteren Verbesserung der Bildinformation wird seit dem Jahr 1999 ein so genanntes „Composite – Bild“ aller großen 4 österreichischen Wetterradars angeboten. Diese „Überlagerung“ von 4 Bildern ist für die Hagelabwehr nur für die Wetterradars Schwechat und Zirbitzkogel von Relevanz. Mit dieser versucht man, unterschiedliche Echos der beiden Radaranlagen zu einer einheitlichen Darstellung zu optimieren. In Kapitel 14 wird man sehen, wie unterschiedlich die Radarechos der Wetterradars Schwechat und Zirbitzkogel ein und derselben Gewitterzelle zur selben Uhrzeit sind. Neben diesen Bild-Informationen des Radarschirmes für den Einsatzleiter konnte durch die Entwicklung eines Hagelanalyseprogrammes[100] an der TU Graz auch weitere Information für den Hagelanalysten zur Verfügung gestellt werden. Daten zu den so genannten „Topshöhen“[101], zu den Intensitäten (siehe Stufenskalen) und zur Höhe der maximalen Intensität konnten abgerufen werden. Bei diesen Programmen konnte man auch in 10 -Minuten- bzw. 1- Stunden-Schritten zeitlich nach vor oder zurück blättern. Die Kern-zonen der zu verfolgenden Gewitterzellen ermöglichten es, so genannte „Gewitterzugpfade“ zu legen und damit die räumliche und zeitliche Dynamik des Gewitter- bzw. Hagelereignisses zu erfassen.

[100] wird in Kapitel 13 kurz vorgestellt

[101] „Topshöhen“ sind die Wolken(turm)obergrenzen in Meter bzw. Kilometer über Grund

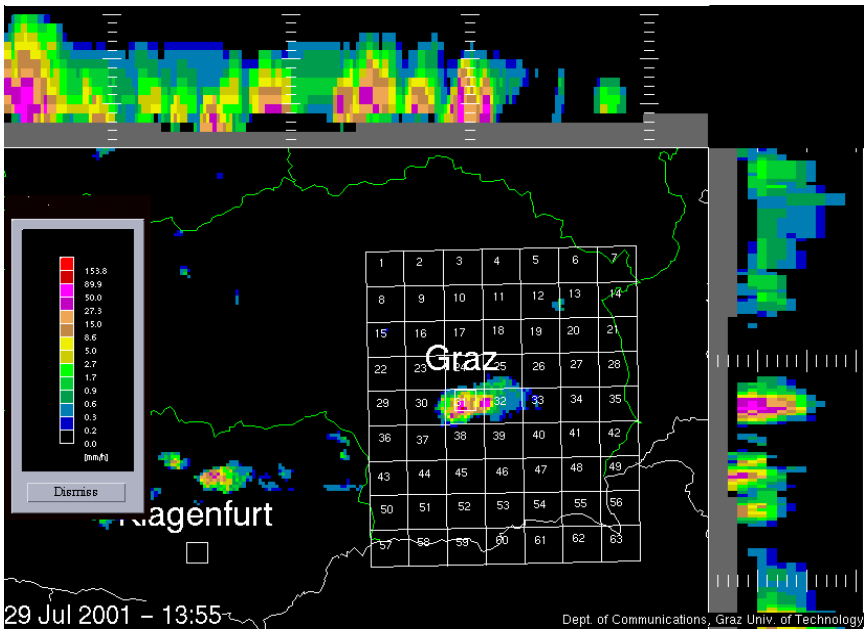


Abb. 12.4: Hagelgewitter über Graz, mit Topshöhe 12 km, Höhe maximaler Intensität (Stufe 12) in 3000 – 6000 m (Bild von der TU Graz 2004 zur Verfügung gestellt).

12.1.3.3. Das Wetterradar auf der Reicherhöhe

Da der Untersuchungszeitraum für diese Arbeit von 1991 – 2002 lag, fällt die Errichtung und der Betrieb des neuen Radars nicht mehr in diesen Zeitraum. Um zu zeigen, dass mit diesem Radar deutliche Verbesserungen einhergegangen sind, sollen hier kurz ein paar Kerninformationen angeführt werden.

Abb. 12.5.: Wetterradarturm (links) und Radarschirmdarstellung (Quelle: www.hagelabwehr.at, 2005)

Da die Effizienz der präventiven Hagelabwehr entscheidend von der rechtzeitigen Erkennung hagelträchtiger Gewitterwolken abhängt, entstand bereits in den 1990er-Jahren der Wunsch, die im Rahmen eines wissenschaftlichen Projektes der TU Graz zur Verfügung stehenden Daten des Wetterradarverbundes Österreich der Austro Control in kürzeren Abständen zu erhalten. Die Intervalle zwischen den einzelnen Radarbildern konnten von zunächst 15 Minuten auf bis zu 10 Minuten gesenkt werden. Obwohl die Intervallfrequenz weiter auf 5

Minuten verringert werden konnte, konnte die Einsatzleitung der Hagelabwehrgenossenschaft wegen einer zu gering dimensionierten Datenleitung weiterhin nur alle 10 Minuten ein Bild empfangen. Ein neues eigenes Radar sollte angeschafft werden. Im Jahr 2000 gelang es schließlich, die Finanzierung des Ankaufes durch Beiträge der Mitgliedsgemeinden, angesparte Eigenmittel und eine Förderung des Landes Steiermark sicher zu stellen. Als Standort wurde die Reicherhöhe, Gemeinde Übelbach, gewählt, da diese nicht nur eine topographisch und geographisch günstige Lage darstellte, sondern auch seit 1982 eine geprüfte Wetterstation des Flugwetterdienstes der Austro Control beherbergt. Der Probebetrieb konnte in der Hagelsaison 2003 aufgenommen werden. Die Radaranlage (AWRS 2001C-D) ist ein slowenisches Fabrikat und unterscheidet sich vom Wetterradar Zirbitzkogel vor allem dadurch, dass alle 30 Sekunden ein 360° Volumsscan durchgeführt wird und die Einsatzleitung seit der Saison 2005 ein „Online-Bild“, das heißt eine Aufnahme des jeweils gerade gegebenen Atmosphärenzustandes zur Verfügung hat. Bis zum Jahr 2004 hatte man noch alle 3 Minuten ein Bild zur Verfügung. Auf eine genaue technische Beschreibung wir hier aus eingangs erwähnten Gründen verzichtet.

12.1.4. Radiosondenaufstiege

Radiosondenaufstiege werden am Flughafen Graz-Thalerhof vom Wetterdienst der Austro Control um etwa 3 – 5 Uhr UTC[102] durchgeführt. Dabei handelt es sich um eine Sonde, die mittels Ballon so hoch aufsteigt, bis der Ballon aufgrund des geringer werdenden Außenluftdrucks zerplatzt. Dies passiert üblicherweise in 8000-10000 Metern Höhe über Grund. Folgende Daten werden gemessen: Höhe der 0°-Isotherme, Höhe der –20°C-Isotherme, Labilität, Zeitpunkt des Erreichens der berechneten Auslösetemperatur, vertikales Windprofil und Windscherung, Windverhältnisse im 850 hPa - und im 500 hPa - Niveau.

Da die Aufstiege sehr früh am Tage stattfinden und die für ein mögliches Hagelereignis einsetzende konvektive Bewölkung meist erst am frühen oder späten Nachmittag beginnt, sind diese Daten von weniger großer Relevanz. Die Sondendaten kann man weltweit über folgende Internetadresse abrufen: http://weather.uwyo.edu/upperair/europe.html (Stand: 28.07.2005). Graz hat die Stationsnummer 11240.

[102] UTC = Universal Time Coordinated (= Greenwich Meantime, d.h. MEZ minus eine Stunde)

12.1.5. Seedingreports

Seedingreports werden von den Hagelabwehrpiloten der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft während und nach erfolgtem Einsatz zum Zwecke der Nachvollziehbarkeit ihrer operativen Tätigkeit verfasst. Diese Reports zählen nicht nur zu den „Einflussgrundlagen“ für diese Arbeit, sondern wurden auch in den Hagelanalyseprogrammen, die in Kapitel 13 diskutiert werden, verarbeitet.

Die Seedingreports beinhalten folgende Daten:

Datum, Einsatznummer, Name des Piloten, Kennzahl des Flugzeugs; Flugzeit (von-bis), Generator-Brenndauer (Minuten, Planquadrat), AgJ-Verbrauch in Liter, Fackel-Einsatz (Stück, Uhrzeit, Planquadrat), Einsatzbereich (Uhrzeit, Planquadrat, wobei alle 30 Minuten eine neue Positionsangabe erfolgt), Aufwind (in „feet“[103], Planquadrat), Wolkenbasis in feet, Temperatur-Flughöhe, eine eventueller Temperatursturz (Uhrzeit, auf °C), Gewitterzugrichtung, Sonstiges (z.B.: Hagel usw.).

Ein Original eines Seedingreports ist dem Anhang zu entnehmen. Als problematisch bei der Auswertung haben sich die sehr ungenauen Positionsangaben erwiesen. Ein Planquadratviertel hat eine Grundfläche von 6 mal 6 Kilometer, was für ein oft räumlich eng begrenztes Hagelereignis zu groß ist. Ebenso ist die Pilotenangabe ein Schätzwert. Eine Aufrüstung mit GPS (siehe auch oben) wäre hier empfehlenswert, konnte aber aufgrund technischer Probleme im Untersuchungszeitraum nicht zufrieden stellend durchgeführt werden. Ebenso sind die Angaben zur Ausbringung von AgJ mit Brennern oder Fackeln sehr ungenau, die große Zeitspanne von 30 Minuten von einer Ortsangabe zur nächsten ist ebenso viel zu groß gewählt. Das Problem der Ungenauigkeit gilt auch für alle anderen Angaben des Berichtes. Mit Hilfe des „Hobiger-Programmes“[104] konnten die Daten der Seedingreports den jeweiligen Radarbildern überlagert werden und lieferten so eine anschauliche Graphik. Die genauen Vergleiche werden anhand der Fallbeispiele in Kapitel 14 diskutiert.

[103] 1 „foot“ entspricht etwa 1/3 Meter. In der Fliegerei werden nach wie vor amerikanische Einheiten gegenüber dem internationalen Maßeinheitensystem bevorzugt.
[104] siehe Kapitel 13

12.2. Wirkungsgrundlagen

Wirkungsgrundlagen sind Aspekte, die nach einem Hagelereignis erhoben werden bzw. für die Analyse und Bewertung desselben relevant sind. Nachstehend werden vier Aspekte diskutiert, die mehr oder weniger große Bedeutung für die Diskussion der Fallbeispiele hatten.

12.2.1. Gewitterreports

Gewitterreports wurden nur in der Zeit vor der Verfügbarkeit des Wetterradars von der Hagelabwehrgenossenschaft erstellt. Diese enthielten den Zeitpunkt der ersten Erkennung der Gewitter, die Zugrichtung, die Andauer des Niederschlages bzw. des Hagelschlages, die geschätzte Hagelfläche und die Hagelschäden sowie die geschädigte Kulturart. Die Angaben der Gewitterreports stellten sich vor allem was die Hagelschadendaten betrifft, als lückenhaft und zum Teil zu ungenau heraus. Seit Beginn der 1990er Jahre werden diese Berichte nicht mehr erstellt.

12.2.2. Klimastationen

Für die nachträgliche Bewertung von Hagelereignissen konnten auch die Daten der ZAMG – Klimastationen genutzt werden, die Niederschlags- und Temperaturwerte sowie die Niederschlagsart liefern. Vor allem jene Stationen, die im Untersuchungsgebiet liegen, konnten hilfreiche Daten liefern. Nachstehend eine direkt von der ZAMG Wien zur Verfügung gestellte Aufstellung der Klimastationen im Untersuchungsgebiet.

Ihre Lage wird mit einer RASTER2-Kennung angegeben[105]

fuer die Region S T E I E R M A R K STK UND RAD

ZAMG-Stat.Nr.	Seehoehe (m)	Klimastation	RASTER 2 RRRR
16520	465	Weiz	1848
16500	375	Gleisdorf	3312
16412	365	Graz-Universitaet	3125
16411	725	St.Radegund	2426
16510	540	Lassnitzhoehe	3216
16401	435	Graz-St.Peter	3217
20900	210	Bad Radkersburg	5637
16400	340	Graz-Flughafen	3822

[105] diese Kennung wird in Kapitel 12.2.3. erläutert.

13500	625	Birkfeld	1234
13400	925	Rechberg	1744
13510	1020	Fischbach	0449
13610	450	Kirchberg-Grafendf.	1434
13600	430	Altenberg-Hartberg	2131
16600	275	Fuerstenfeld	3542
19200	305	Bad Gleichenberg	4821
16300	400	Lobming b.Voitsberg	3031
18900	410	Deutschlandsberg	4435
20600	900	Wiel b.Eibiswald	5045
19000	275	Leibnitz	5312
16420	1435	Schoeckl	2422

Für die vorliegende Untersuchung wurden Daten der Klimastationen nur als Ergänzung und als Bestätigung von Informationen, die aus anderen Quellen bereits gegeben waren, genutzt. Eine Österreich-Karte aller ZAMG-Stationen findet sich im Anhang.

12.2.3. Hageltestplatten

Das Hageltestplattenprogramm[106] wurde von der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft in Zusammenarbeit mit der ZAMG Wien initiiert und von Otto Svabik umgesetzt. Das Hageltestplattenprogramm lief 1982 in der Steiermark an. Wenige Jahre vorher startete O. Svabik im Raum Krems – Langenlois (Niederösterreich) ein solches Programm. Das Schutzgebiet in der Steiermark wies am Beginn des HTP- Projektes eine Fläche von rund 500 km² auf, nach seinem Ausbau nach Norden und nach Westen hin ab dem Jahr 1987 rund 730 km². Mit dem Ausbau sollten auch Hagelregistrierungen aus dem unmittelbaren Vorfeld des Hagelschutzgebietes gewonnen werden. Besonderes Interesse galt der Linie Gratkorn – Hitzendorf westlich von Graz. Letztendlich befinden sich 181 Stationen südlich und östlich des Impfbereiches. Heute umfasst das Gebiet zwei Kernräume, den Raum Radkersburg (als „RAD“ bezeichnet)[107] und den Raum Weiz - Gleisdorf (als „STK“ bezeichnet).[108] Das HTP- Netz umfasste vor seinem weiteren Ausbau 116 Messstellen. Es erstreckt sich westlich des zentral gelegenen Raabtales, über das Rabnitztal hinaus bis nahe an den Nordostrand der Landeshauptstadt Graz, und östlich bis zum Feistritztal; als östlichste Gemeinde wäre Großhartmannsdorf anzugeben. Der südwestliche Rand entspricht der Linie Studenzen- Laßnitz-

[106] Hageltestplatte = HTP

[107] Der Entwurf des Sondermessnetzes für den Bezirk Radkersburg (RAD) wurde vom der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft übernommen, die Aufstellung der 81 Messgeräte im August 1985 abgeschlossen.

[108] Im Anhang befinden sich Aufstellungen über die Stationen STK und RAD mit den zugehörigen Positionsangaben.

höhe, der nördliche der Linie Weiz- Stubenberg. Alle HTP- Stationen haben eine alphanumerische Kennung. Seit 1982 bestehen folgende Messstellen (siehe auch Abb.12.8-12.11):

A07 – A09, B06 – B13, C06 – C14, D05 – D16, E05 – E16, F 04 – F16,
G03 – G16, H04 – H17, J04 – J16, K06 – K15, L04, L07 – L13

Das Grundmessnetz wurde in den Folgejahren um folgende Stationen erweitert:

1983: J02,
1984: W01, X01 – X10, Y01 – Y09, A06, A10 – A14, B05, C05, D04, H03, J03,
L05, L06
1985: Y10, A15, B03, B04, B14, B15, C03, C04, C15, D03, E03,
E04, F02, F03, G02, H02, K04, K05; R01 – R81
1986: V01 – V12, die „Hitzendorfer- Linie“ westlich von Graz.

Das heißt also, dass nicht das gesamte Einsatzgebiet der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft von einem Messstationsnetz bedeckt ist. Der Bereich Radkersburg wird von der Firma „Südflug“ beflogen. Für die Auswahl der Fallbeispiele (siehe Kapitel 14) wurden daher Hagelereignisse gewählt, die weitgehend im Bereich der Messstationen liegen.

Die Zuordnung der Stationen und ihrer Nummern erfolgte nach Planquadraten und deren Unterteilungen, so dass eine vierstellige Zahl die Position auf eine Fläche von 2 mal 2 Kilometer (entspricht auch der Auflösung des Zirbitzkogelradars im Untersuchungszeitraum) angibt (zur Verfügung gestellt von O. Svabik):

```
ZUR RASTER - SYSTEMATIK:
C-------------------------------------------------------------------
C        .............     .............     .............
C        .           .     .     .     .     .1 2 3.     .
C        .           .     .  1  .  2  .     .4 5 6.     .
C        .           .     .     .     .     .7 8 9.     .
C        .    P Q    .     .............     .............
C        .           .     .     .     .     .     .     .
C        .           .     .  3  .  4  .     .     .     .
C        .           .     .     .     .     .     .     .
C        .............     .............     .............
C-------------------------------------------------------------------C
P Q .........Nummer der Planquadrates     ZWEISTELLIG
C                     Planquadratviertel           EINSTELLIG
C           Zuordnung im Planquadratviertel        EINSTELLIG
C-------------------------------------------------------------------
C       Beispiel: der Raster   2428  befindet sich im  .....,
C                                    an der Stelle  X
C                                    .............
C                                    .     .o o o.
C                                    .     .o o o.
C                           PQ 24_   .     .o X o.
C                           ......   .............
```

```
C                                    .     .     .
C                                    .     .     .
C                                    .     .     .
C                                    .............
C-------------------------------------------------------------------
C     Soweit es moeglich ist, werden die Gemeinden unterteilt in:
C     Gemeinde-NORD, Gemeinde-SUED, Gemeinde-OST UND Gemeinde-WEST
C     VOR dem Raster steht der Gemeindeteil mit der Kennung
C              N              S              E                W
```

Jede Station wird von engagierten Bürgern ehrenamtlich betreut, nach jedem Hagelschlag werden die getroffenen Platten nach Wien zu Otto Svabik an die ZAMG geschickt, sowie begleitend dazu ein Kärtchen mit der Hagelschlagsmeldung dazugegeben. Für die vorliegende Untersuchung stellte sich heraus, dass zwar die Platten regelmäßig eingesandt wurden, jedoch von den HTP-Kärtchen[109] nur eine geringe Zahl für die Auswertung zur Verfügung stand. Das heißt, auch hier hatte man fehlende Datensätze zu verkraften. Eine Hagelplattenmessstation besteht aus einem Metallgerüst, das ungefähr 1,50 m hoch ist, und fünf 2 cm dicke Styroporplatten (32 x 32 cm) trägt, wobei eine Platte als horizontale Deckplatte ausgeführt ist, die anderen vier Platten in je eine der Himmelsrichtungen weisen (siehe Abb.12.6)

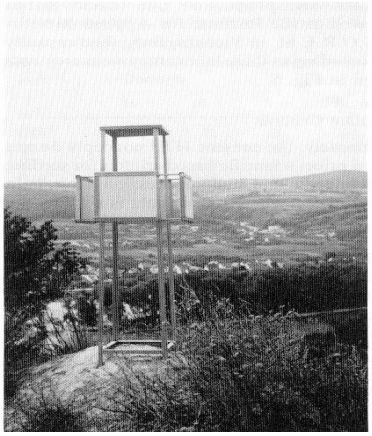


Abb. 12.6.: Links: Messstationsgerüst ohne Platten (Roseggerweg , Graz – Nordost, aufgenommen am 3.11.2001), rechts: Messstation mit Platten (aus: Svabik, 1989)

[109] siehe Abb. 12.11

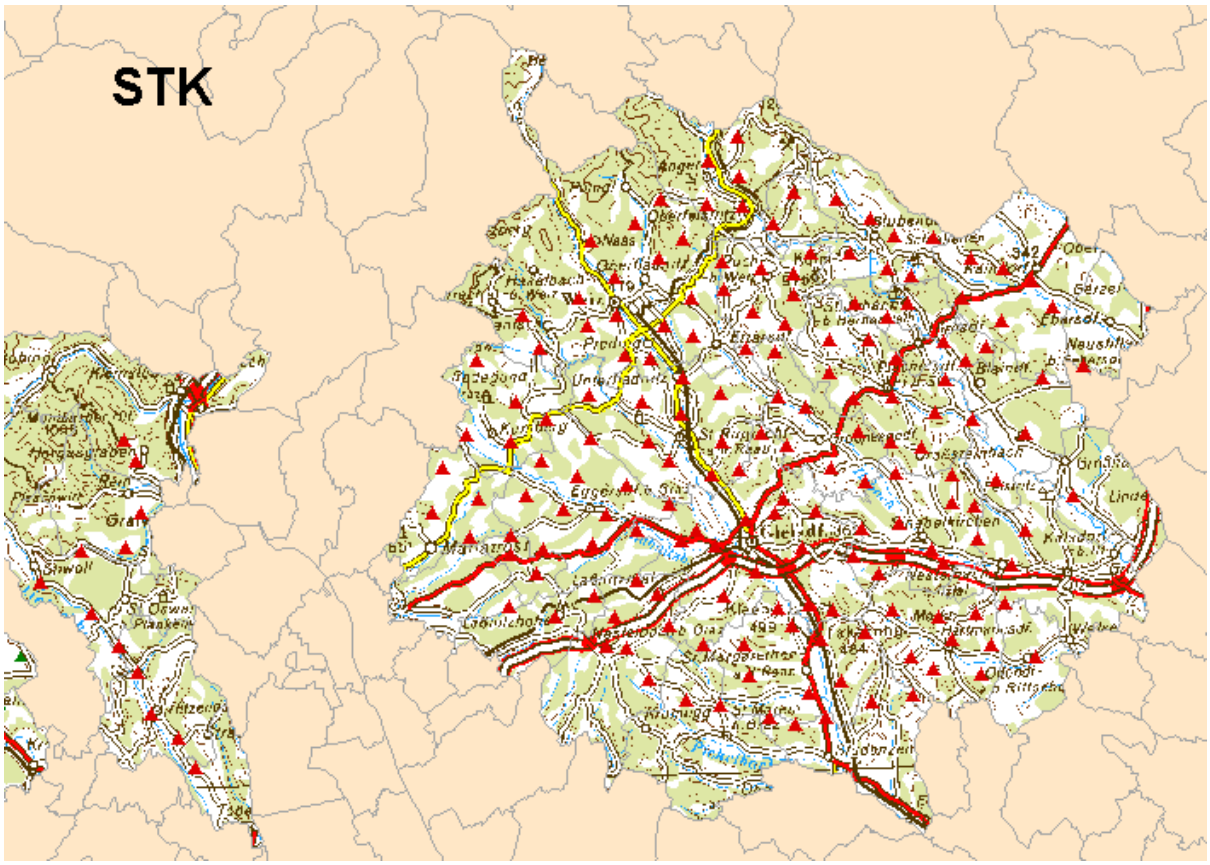


Abb. 12.7.: Karte des Hageltestplattengebietes Weiz-Gleisdorf („STK“), zur Verfügung gestellt von O. Svabik, ZAMG Wien

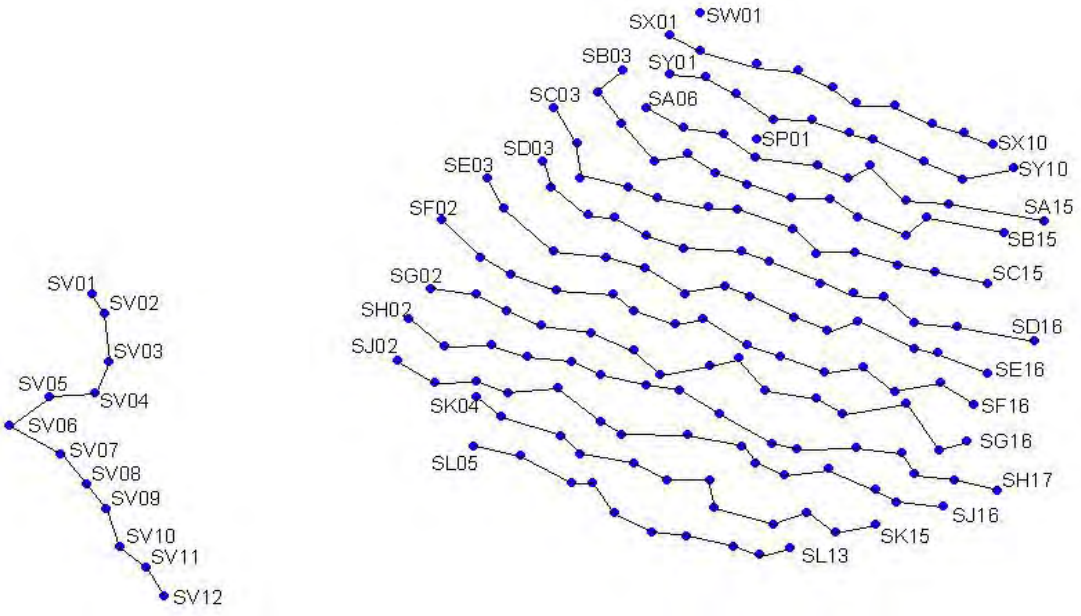


Abb. 12.8: Bezeichnungen der HTP-Stationen im Gebiet STK (zur Verfügung gestellt von O. Svabik, ZAMG Wien)

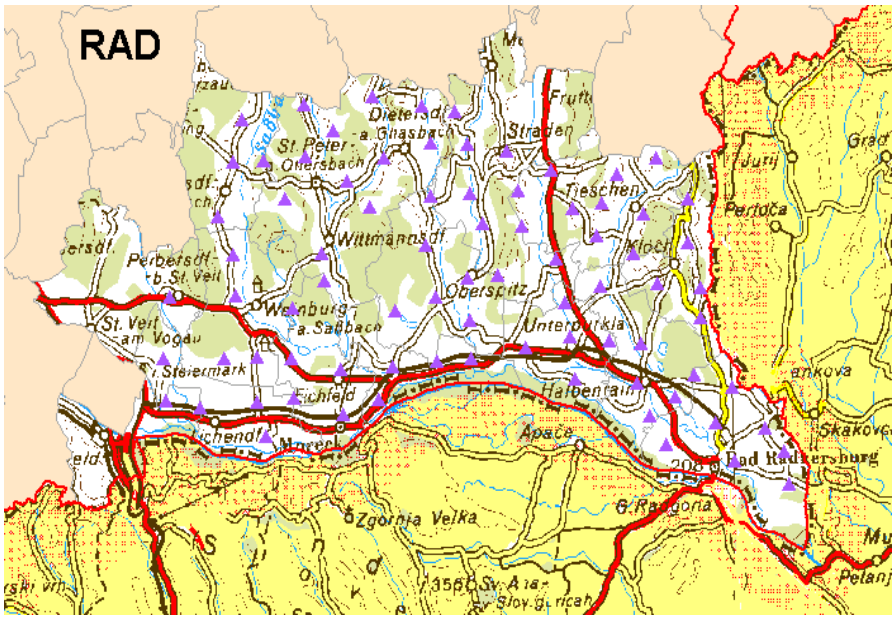


Abb. 12.9.: Karte des Hageltestplattengebietes Radkersburg („RAD“), zur Verfügung gestellt von O. Svabik, ZAMG Wien

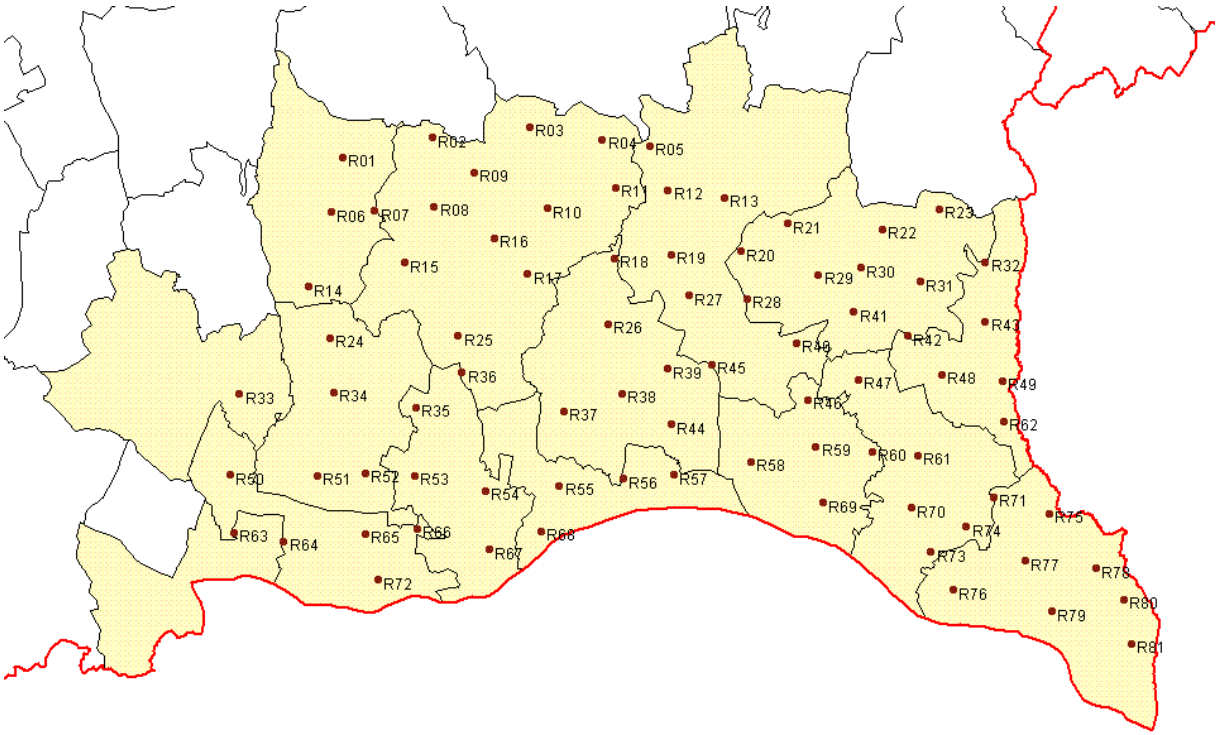
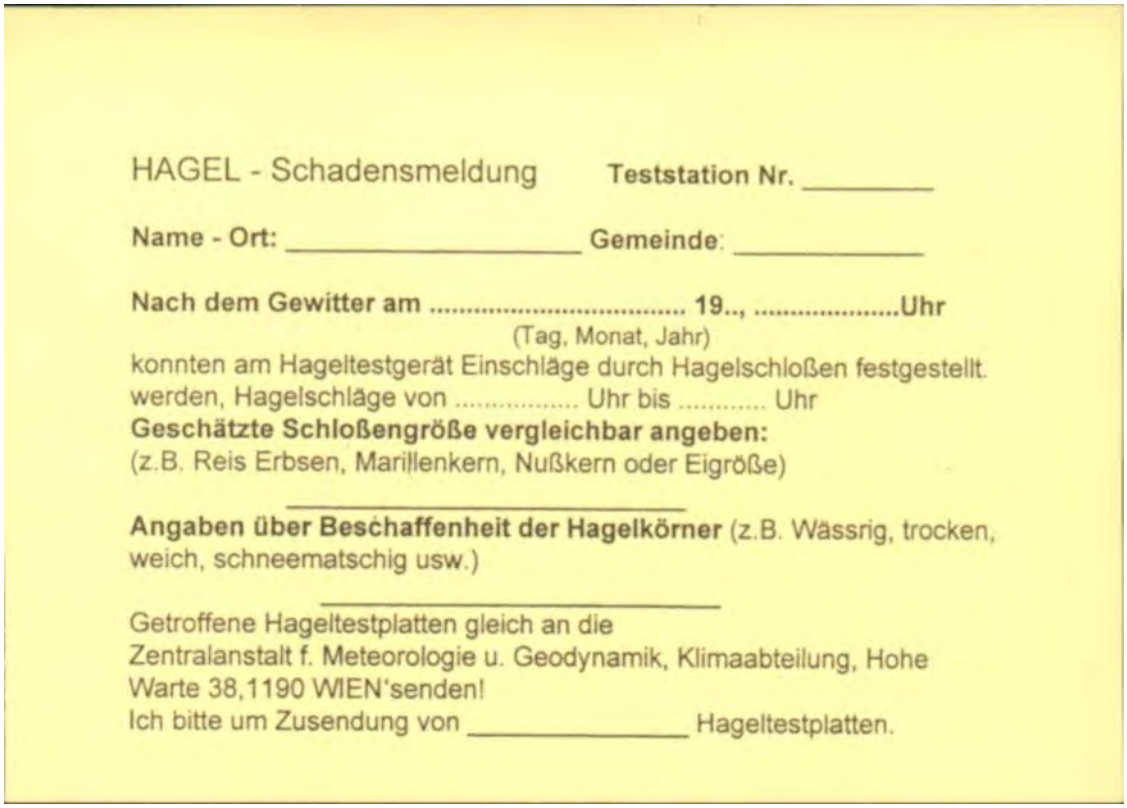


Abb. 12.10: Bezeichnungen der HTP-Stationen im Gebiet STK (zur Verfügung gestellt von O. Svabik, ZAMG Wien)

Bei der Auswertung der vom Hagel getroffenen Platten kann auf die Zugrichtung des Hagelgewitters bzw. auf die Strichrichtung des Hagelschlages geschlossen werde. Die Tiefe der Abdrücke ist ein Maß für die Bewegungsenergie der auftreffenden Hagelkörner, wobei auch

der Einschlagswinkel berücksichtigt werden muss. In der statistischen Auswertung wurden vor allem die Kornklassenspektren ermittelt, das heißt, die Größe der Hagelschlossen und die Bewegungsenergie pro Quadratmeter. Diese beiden Größen sind ein Maß für die Schadhagelwahrscheinlichkeit, wobei je nach Kulturart die Energien für die schädigende Wirkung des Hagels unterschiedlich sind.[110]



HAGEL - Schadensmeldung **Teststation Nr.** _____

Name - Ort: _____ **Gemeinde**: _____

Nach dem Gewitter am ..... **19..,** .....**Uhr**
(Tag, Monat, Jahr)
konnten am Hageltestgerät Einschläge durch Hagelschloßen festgestellt.
werden, Hagelschläge von ..... Uhr bis ..... Uhr
Geschätzte Schloßengröße vergleichbar angeben:
(z.B. Reis Erbsen, Marillenkern, Nußkern oder Eigröße)
_____
Angaben über Beschaffenheit der Hagelkörner (z.B. Wässrig, trocken, weich, schneematschig usw.)
_____
Getroffene Hageltestplatten gleich an die
Zentralanstalt f. Meteorologie u. Geodynamik, Klimaabteilung, Hohe Warte 38,1190 WIEN'senden!
Ich bitte um Zusendung von _____ Hageltestplatten.

Abb. 12.11.: HTP-Hagelschadensmeldung, zur Verfügung gestellt von der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft

Der Niederschlag in Form von Hagel wird in Klassen auf Grund des Korndurchmessers eingeteilt. Körner mit einem Durchmesser von ≥ 5 mm werden als Hagel angesprochen.

Ebenso spielt der Einfallswinkel der Hagelkörner eine Rolle. Bei vertikalem Aufprall entstehen auf der Hageltestplatte (HTP)[111] kreisförmige Abdrücke, mit zunehmendem Einfallswinkel (= Abweichung von der Vertikale) wird der Abdruck zunehmend elliptisch.

[110] Genaueres siehe Kapitel 12.2.5.
[111] HTP; engl."hailpad"

Die Bestimmung der Auftreffgeschwindigkeit bzw. kinetischen Energie der Hagelkörner folgt den klassischen physikalischen Gesetzmäßigkeiten, wobei Bilham und Relf bereits 1937 aus der Theorie die Auftreffgeschwindigkeit folgendermaßen hergeleitet haben:

$$v_E = \sqrt{\frac{4\rho_H gD}{3\rho_a c_d}}\,, \tag{12-6}$$

mit D .....Durchmesser des Hagelkorns (in mm)

ρ_H.....Dichte des Hagelkorns (meist 0,9 g/cm³)

ρ_a.....Dichte der Luft in Abhängigkeit von Höhe und Temperatur

g.....Fallbeschleunigung (9,81 m/s²)

c_d.....Drag Coefficient (= Luftwiderstandsbeiwert, = 0,55)

Die Aufprallgeschwindigkeit hat dann die Einheit m/s. Somit ergibt sich für jedes Beobachtungsgebiet ein direkt proportionaler Zusammenhang zwischen Aufprallgeschwindigkeit und Korndurchmesser.

Es gilt: $v_E = C \cdot \sqrt{D}$, (12-7)

wobei C den konstanten Faktor aus Gleichung 12-6 darstellt.

Für die Bewegungsenergie des Hagelkorns zum Zeitpunkt des Aufpralls gilt:

$E_{KIN,H} = \frac{1}{2} m_H v_E^2$, wobei m_H... Masse des Hagelkorns (12-8)

mit $m_H = \rho V_H$ und $V_H = \frac{4\pi}{3}\left(\frac{D}{2}\right)^3$ (12-9) (12-10)

wobei V_H.... Volumen des Hagelkorns

somit folgt: $E_{KIN,H} = \left(\rho_H \cdot \frac{\pi}{12} \cdot C^2\right) \cdot D^4$, (12-11)

wobei der Klammerausdruck die Konstante G darstellt.

Damit ist die kinetische Energie in erster Linie vom Durchmesser des Hagelkornes abhängig:

$$E_{KIN,H} = G \cdot 10^{-6} \cdot D^4 \tag{12-12}$$

Die kinetische Energie wird nun in Joule (J) angegeben, wenn der Hagelkorndurchmesser in Millimeter angegeben wird. Durch Aufsummieren erhält man schließlich die auftreffende

kinetische Energie pro Quadratmeter. Die Abhängigkeit des Betrages der auftreffenden kinetischen Energie vom Einfallswinkel α ergibt sich für einen bekannten α bei $\alpha \neq 0$:

$E_\alpha = E_0 (\cos\alpha)^{-1}$, wobei E_0..... kinetische Energie bei Einfallswinkel 0° (12-13)

Zur Kalibrierung der Testplatten wurde mit Hilfe von Stahlkugeln, die die Hagelkörner simulierten, die Fallhöhe der Kugeln bestimmt und die anderen oben diskutierten Größen und Formeln entwickelt. Ein an der ZAMG entwickeltes Rechenprogramm ermöglicht es, die gewünschten Ausgabedaten (Energiewerte) nur durch Eingabe von Anzahl und Größe der Plattenabdrücke zu bekommen.

Die Auswertung der HTP-Platten des Messnetzes STK der Jahre 1982-2001 wurde im Oktober 2004 von Otto Svabik fertiggestellt und veröffentlicht. Die zentralen Aussagen seien hier in Tab. 12.3. zusammengefasst:

Hagelkornspektren

Kornanzahl	Dm 5 mm	Dm 10 mm	Dm 15 mm	Dm 20 mm	Dm 25 mm
MW82-86	91,7	42,5	14,1	6,0	3,2
MW87-91	169,3	54,1	16,3	8,2	2,9
MW92-96	220,8	64,3	12,0	5,8	2,8
MW97-01	324,5	90,0	22,7	4,1	1,8

	Tage mit Hagel	HTP pro Hagel
MW82-86	15,6	8,7
MW87-91	15,0	6,0
MW92-96	12,2	4,8
MW97-01	12,4	3,9

	E (Joule/m²)
MW82-86	76,4
MW87-91	72,6
MW92-96	78,9
MW97-01	100,0

	Tage mit Hagel	HTP pro Hagel
MW82-91	15,3	7,4
MW92-01	12,3	4,3
Abnahme	20%	58%

	E (Joule/m²)
MW82-91	74,5
MW92-01	89,4
Zunahme	20%

HAGELSCHADEN „APFEL“

MW81-90	38%	Ertragsminderung
MW91-00	44%	Ertragsminderung
Zunahme	6%	

Tab. 12.3.: Hageltage, HTP mit Hagel, Energiewerte und Ertragsminderungen im Zeitraum 1982 – 2001 (Svabik, 2004).

Für das Jahr 2002 (das letzte des Untersuchungszeitraumes für die vorliegende Arbeit) gelten folgende Werte:

Hagelkornspektrum 2002

Kornanzahl	Dm 5 mm	Dm 10 mm	Dm 15 mm	Dm 20 mm	Dm 25 mm
2002	173,0	40,8	12,7	2,0	0,3
	Tage mit Hagel	HTP pro Hagel			E (Joule/m²)
2002	10	3,1		2002	105
Das bedeutet eine Ertragsminderung von 49%.					

Tab. 12.4: Wie Tab. 12.3 für das Jahr 2002 (Svabik, 2004)

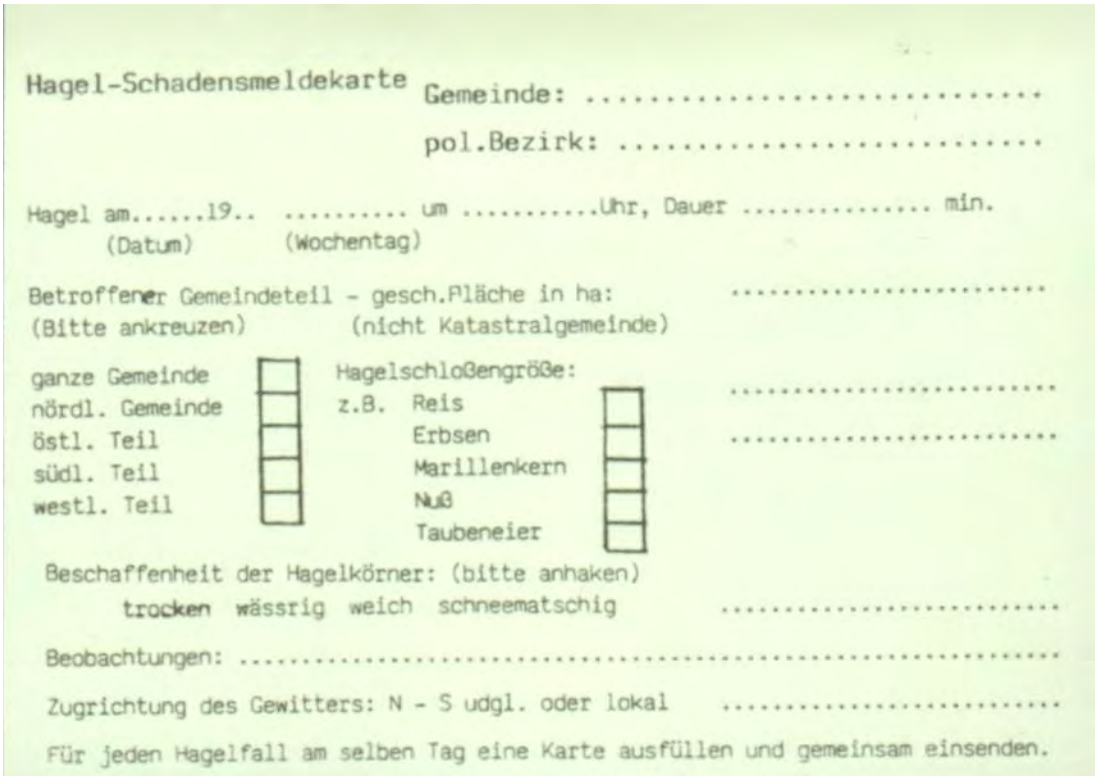
Diese Ergebnisse zeigen, dass in der zweiten Dekade (von 1991 – 2001 die kleinen Kornklassen zugenommen haben, die großen abgenommen haben, was für die Wirksamkeit der aktiven Hagelabwehr spricht. Ebenso hat die Zahl der Hageltage abgenommen, was nicht notwendigerweise der Hagelabwehr zuzuschreiben ist, sondern auch unabhängig davon meteorologische Ursachen haben könnte. Die Anzahl der Körner pro HTP hat in der zweiten Dekade zugenommen. Die Anzahl der getroffenen HTPs pro Hagelereignis ging in der zweiten Dekade zurück, was darauf schließen lässt, dass die Hagelgewitter räumlich enger begrenzt auftreten. Eine Hageltestplattenstation repräsentiert eine Fläche von etwa 4 km², das heißt, dass die bei einem Hagelereignis durchschnittlich verhagelte Fläche fast um die Hälfte von 34 auf 16 km² abgenommen hat. Der durchschnittliche Energiewert zeigte sich während der ersten drei Pentaden relativ konstant, stieg jedoch während der letzten Jahre doch deutlich an. Die Ursache dafür ist die Zunahme der Heftigkeit der Hagelgewitter in den letzten Jahren. In den Jahren 1982 – 2001 konnte auch eine Verlagerung der höchsten Energiewerte Richtung Nord bis Nordwest des HTP-Netzes festgestellt werden. Betreffend die Hauptkultur der Landwirtschaft, nämlich Apfel, werden im Zeitraum 1997-2001 nur noch halb so viele Obstanlagen von Hagel getroffen, die Ertragsminderung ist jedoch leicht gestiegen. Durch den Rückgang der durchschnittlich verhagelten Fläche um etwa 40%, betrifft diese Steigerung der Ertragsminderung nur mehr 60% der vor 20 Jahren von Hagelereignissen betroffenen Fläche, wodurch sich bezogen auf diese seinerzeit von Hagelschäden betroffenen Flächen eine Verminderung des Schadens auf 26,4% ergibt (Lorber, Domittner, 2005).

Für die vorliegende Arbeit wurden die Daten der HTP-Auswertung herangezogen und stellten sich als zuverlässigste Datenquelle heraus.

12.2.4. Hagelkarten

Diese Karten werden von Hagelbeobachtern (meist Landwirte in den Einsatzgebieten) nach einem Hagelereignis ausgefüllt und entweder direkt an die Hagelabwehrgenossenschaft geschickt oder zuerst bei der jeweiligen Gemeinde gesammelt und dann an die Genossenschaft geschickt. Die Karten enthalten folgende Informationen:

Gemeinde, politischer Bezirk, Datum, Uhrzeit und Dauer des Hagelschlages, betroffener Gemeindeteil, geschätzte Fläche in Hektar, Hagelschlossengröße, Beschaffenheit der Hagelkörner, Gewitterzugrichtung und sonstige Beobachtungen (siehe Abb. 12.12)


Hagel-Schadensmeldekarte Gemeinde: .....
pol.Bezirk: .....

Hagel am.....19.. ..... um .....Uhr, Dauer ..... min.
(Datum) (Wochentag)

Betroffener Gemeindeteil - gesch.Fläche in ha: .....
(Bitte ankreuzen) (nicht Katastralgemeinde)

ganze Gemeinde ☐
nördl. Gemeinde ☐
östl. Teil ☐
südl. Teil ☐
westl. Teil ☐

Hagelschloßengröße: .....
z.B. Reis ☐ .....
Erbsen ☐
Marillenkern ☐
Nuß ☐
Taubeneier ☐

Beschaffenheit der Hagelkörner: (bitte anhaken)
trocken wässrig weich schneematschig .....

Beobachtungen: .....

Zugrichtung des Gewitters: N - S udgl. oder lokal .....

Für jeden Hagelfall am selben Tag eine Karte ausfüllen und gemeinsam einsenden.

Abb. 12.12: Hagel-Schadensmeldekarte („Gemeindemeldungen“), zur Verfügung gestellt von der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft

Die Wirkungsgrundlage „Hagelkarte“ erwies als besonders ungenau und lückenhaft. Viele Daten fehlten und bei Vorhandensein stellten sich oft große zeitliche und räumliche Diskrepanzen benachbarter Melder für ein und dasselbe Hagelgewitter heraus.

12.2.5. Hagelschadensberichte

Die Schadhagelberichte der Hagelabwehrgenossenschaft wurden schon in Kapitel 12.2.3. kurz geschildert. Demnach kam es in den 1990er Jahren gegenüber den 1980er Jahren zu einer Steigerung der Ertragsminderung von 6% bei der Kultur „Apfel“, bezogen auf die weit geringere verhagelte Fläche in den 1990ern gegenüber den 1980ern zu einer Minderung um etwa 12% (Lorber, Domittner, 2005).

Grundsätzlich ist die Hagelempfindlichkeit verschiedener Kulturpflanzen je nach Pflanzenart unterschiedlich, wobei Obst- und Weinarten empfindlicher sind als etwa Hackfrüchte und Grünland (Pachatz, 1994). Nachstehende Tabelle zeigt die Schäden in % bei verschiedenen Hagel-Energiewerten. Bei Schäden, die zu Ertragsminderung führten, ist Abb. 12.13 heranzuziehen.

	< 50 J/m²	- 100 J/m²	- 200 J/m²	- 300 J/m²	> 500 J/m2
Apfel	50	90	100	-	-
Birne	40	70	95	-	-
Wein	30	50	75	100	-
Mais	10	30	50	60	70

Tab. 12.5.: Hagelschäden (auch leichte ohne volle Ertragsminderung) in Prozent bei verschiedenen Kulturen und Energiewerten. Quelle: Steirische Hagelabwehrgenossenschaft, 1992 (aus: Pachatz, 1994)

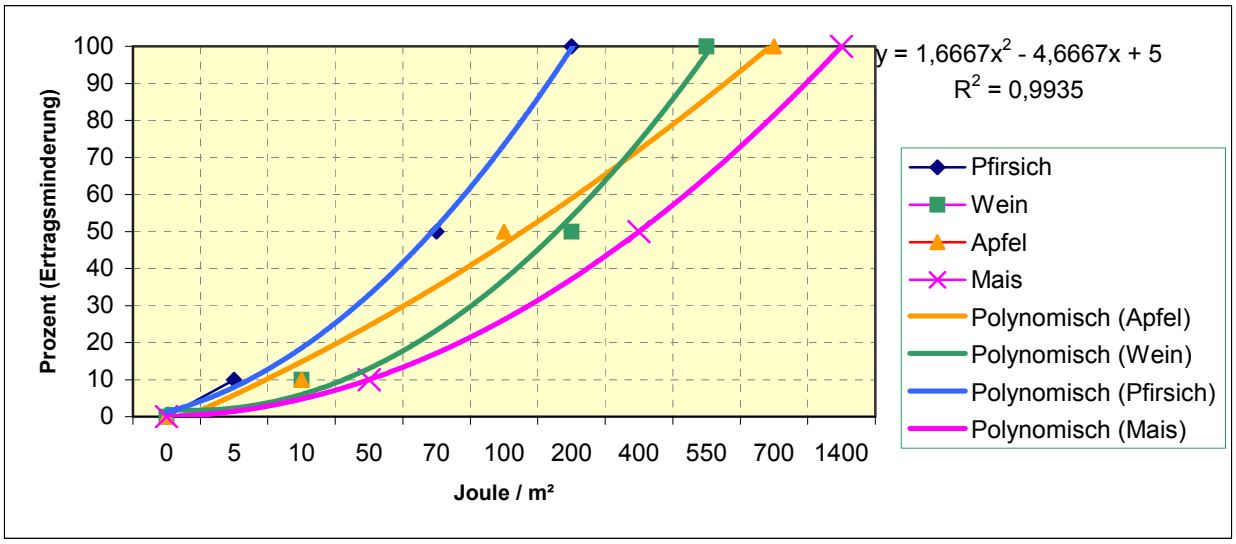


Abb. 12.13.: Ertragsminderung bei verschiedenen Kulturen und Energiewerten (Svabik, 2004)

Abb. 12.13 und Tab.12.5. zeigen, dass der in der Steiermark als Kulturpflanze wichtige Apfel neben Pfirsich besonders anfällig für Schadhagel ist.

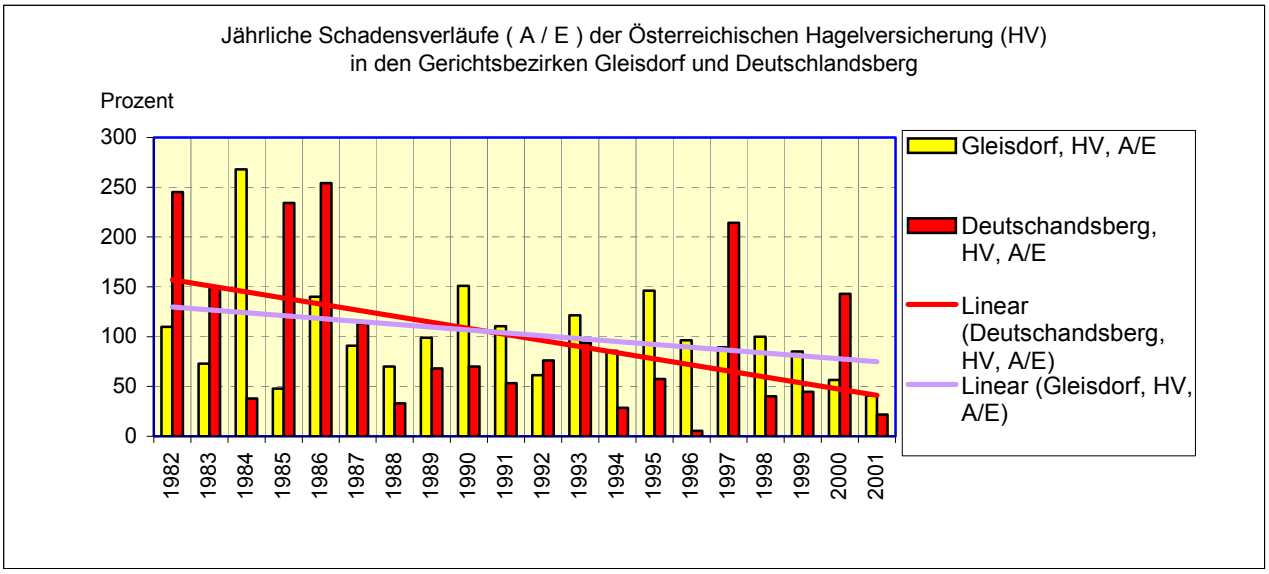


Abb. 12.14: Jährliche Schadensverläufe für die Gerichtsbezirke Gleisdorf und Deutschlandsberg (A = Ausgaben, E = Einnahmen), aus Svabik, 2004

Jahr	Bezirk	Risiko	Prämie (ATS)	Aufwendungen für Schadensfälle (ATS)	Schadensverlauf (in %)
1991	Deutschlandsberg	Hagel	402.007	214.189	53,3
1992	Deutschlandsberg	Hagel	421.078	320.827	76,2
1993	Deutschlandsberg	Hagel	365.893	343.023	93,7
1994	Deutschlandsberg	Hagel	361.058	102.963	28,5
1995	Deutschlandsberg	Hagel	383.430	220.105	57,4
1996	Deutschlandsberg	Hagel	410.599	21.764	5,3
1997	Deutschlandsberg	Hagel	407.676	873.128	214,2
1998	Deutschlandsberg	Hagel	431.408	173.810	40,3
1999	Deutschlandsberg	Hagel	415.163	184.732	44,5
2000	Deutschlandsberg	Hagel	425.468	607.481	142,8
2001	Deutschlandsberg	Hagel	415.447	90.909	21,9
1991	Gleisdorf	Hagel	1.167.256	1.289.882	110,5
1992	Gleisdorf	Hagel	1.180.655	724.253	61,3
1993	Gleisdorf	Hagel	1.156.423	1.404.128	121,4
1994	Gleisdorf	Hagel	1.029.394	882.850	85,8
1995	Gleisdorf	Hagel	1.209.538	1.766.507	146,0
1996	Gleisdorf	Hagel	1.480.584	1.428.297	96,5
1997	Gleisdorf	Hagel	1.561.991	1.394.520	89,3
1998	Gleisdorf	Hagel	1.427.994	1.428.449	100,0
1999	Gleisdorf	Hagel	1.486.191	1.264.813	85,1
2000	Gleisdorf	Hagel	1.486.446	839.951	56,6
2001	Gleisdorf	Hagel	1.314.953	535.657	40,7

Tab. 12.6.: Schadensaufwendungen (Schadensverlauf = A/E in Prozent) der ÖHV für die Gerichtsbezirke Gleisdorf und Deutschlandsberg für die Jahre 1991 – 2001, zur Verfügung gestellt von O. Svabik

Abb. 12.14. zeigt, dass die Schadhageltendenz sowohl in den Gerichtsbezirken Gleisdorf als auch Deutschlandsberg fallend ist, in Deutschlandsberg ergaben die Jahre 1997 und 2000 allerdings auffallend viel Schadhagel gegenüber Gleisdorf. Es sei darauf verwiesen, dass im

Gerichtsbezirk Gleisdorf die steirische Hagelabwehrgenossenschaft flächendeckend tätig, im Raum Deutschlandsberg die „hail air“, allerdings werden dort viele Gemeinden auf eigenen Wunsch nicht von der Hagelabwehr betreut.

Ergänzend zu Tab. 12.5 und Abb. 12.13 sei noch erwähnt, dass am sensibelsten Weichobstkulturen (Beispiel Pfirsich) auf Hagel „reagieren“. Bereits 5 Joule/m² können eine Ertragsminderung von 10 Prozent bewirken. Energiewerte um 200 Joule/m² können bereits bei Pfirsichkulturen zu totalen Ernteausfällen führen. Bei der (im Bereich STK) stark vertretenen Kultur Apfel bedeuten rund 100 Joule/m² eine Ertragsminderung um 50 Prozent, Energiewerte um 700 Joule/m² können bereits einen nahezu vollständigen Ernteausfall bedeuten, da die Früchte nur mehr als Pressobst verwendet werden können. Sensibler ist die Kultur Wein, wo 200 Joule/m² den Ertrag auf die Hälfte reduzieren können, und ab 550 Joule/m² die Trauben sehr schwer geschädigt sind. Am „robustesten“ erscheint die Kultur Mais, wobei erst ab Werten über 1000 Joule/m² Totalausfälle zu erwarten sind (Svabik, 2004).

Detaillierte Daten wurden von der Österreichischen Hagelversicherung (ÖHV) mit Hinweis auf datenschutzrechtliche Gründe nicht zur Verfügung gestellt. Im Statistischen Jahrbuch der Republik Österreich ist unter Punkt 31 (Private Versicherungswirtschaft) und Unterpunkt 31.09 eine wenig detaillierte Aufstellung der Versicherungsprämien und Schadenssummen nach österreichischen Bundesländern für den Zeitraum 1990 – 2003 abgedruckt. Unter Punkt 31.10 findet man für Gesamtösterreich Anteile der Kulturarten an den Versicherungssummen in den Jahren 2002 und 2003, wobei Obstarten nicht näher differenziert ausgewiesen wurden (Statistisches Jahrbuch, 2005).

Welche Schäden Hagel verursachen kann, sei abschließend durch eine Fotoserie aus South Dakota, USA dokumentiert.

Abb.12.15.: Hagelkörner und Schadhagelauswirkung in South Dakota, USA
(aus: Der Spiegel, Nr.41, 1999)

13. Hagelbewertungsprogramme

Im Auftrag der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft wurde im Jahr 1991, also mit Beginn der Radar-Ära für die Hagelabwehr eine Kooperation mit der Technischen Universität Graz, Institut für Nachrichtentechnik und Wellenausbreitung geschlossen. Auf Seiten der Genossenschaft initiierte Hans Gobec diese wissenschaftliche Zusammenarbeit mit W. Randeu und K. Köck vom oben genannten Institut[112]. So wurde nach Anforderungsprofilen der Genossenschaft von letztlich insgesamt drei Herren Diplomarbeiten verfasst, die sich mit der Erstellung von Rechnerprogrammen für die nachträgliche Hagelbewertung beschäftigten.

Bernhard Hobigers Diplomarbeit „Erstellung von Rechnerprogrammen für die Analyse und Bewertung von Wetterradarbildern im Hinblick auf die Erkennung von Hagelereignissen“ war die erste Arbeit dieser Art, die im Oktober 1992 veröffentlicht wurde. Dieses Programm wurde nach Vorgabe wesentlicher, vom Autor dieser Arbeit später „Einfluss- und Wirkungsgrundlagen“ genannter, Größen auf MS DOS-Basis erstellt. Das Programm ermöglichte es, Gewitterdateien zu erstellen und Daten wie Wetterlagen, ECMWF[113]-Daten, Seeding-Reports, Klimastationsdaten, Hagelkarten, Hageltestplatten und Hagelversicherungsdaten einzugeben, diese dann über das Radarbild zu legen und verschiedene Korrelationen zwischen ausgewählten Aspekten zu erstellen. Ebenso konnte man Gewitterzugpfade erstellen, wobei am Radarschirm die Möglichkeit gegeben war, AgJ-Brennereinsatz sowie Fackeleinsatz nach Planquadraten über die Intensitätsverteilung des Radarbildes zu legen (siehe Abb.13.1). Der Sinn des Programms bestand darin, nachträglich Hagelereignisse so analysieren zu können, dass es zu einer Verbesserung der Hagelprävention durch optimierte Vorgehensweisen bei Hagelabwehreinsätzen kommt. Für das Jahr 1991 wurden alle verfügbaren Daten eingegeben, die erhofften Korrelationen zwischen beispielsweise Intensitäten, AgJ-Ausbringung und Schadensmeldungen am Boden blieben jedoch aus. Wie sich später auch durch die Ergebnisse dieser Arbeit herausstellen sollte, waren die Datensätze nicht genau genug, um diese Vorgaben erfüllen zu können. Heute ist es nicht mehr möglich, die damals eingegeben Daten informationstechnisch zu nutzen, da das gesamte Programm auf MS DOS – Basis geschrieben wurde und nicht mit den aktuellen Betriebssystemen

[112] Nach einer Umstrukturierung einiger TU-Institute trägt das Nachfolgeinstitut den Namen „Institut für Breitbandkommunikation“

kompatibel ist. Für diese Arbeit wurden vom Autor auf einem alten MS DOS-Rechner die Daten rekonstruiert und vom Bildschirm abfotografiert. Diese Bilder befinden sich im Anhang, die Daten wurden für die Diskussion der Fallbeispiele verwendet.

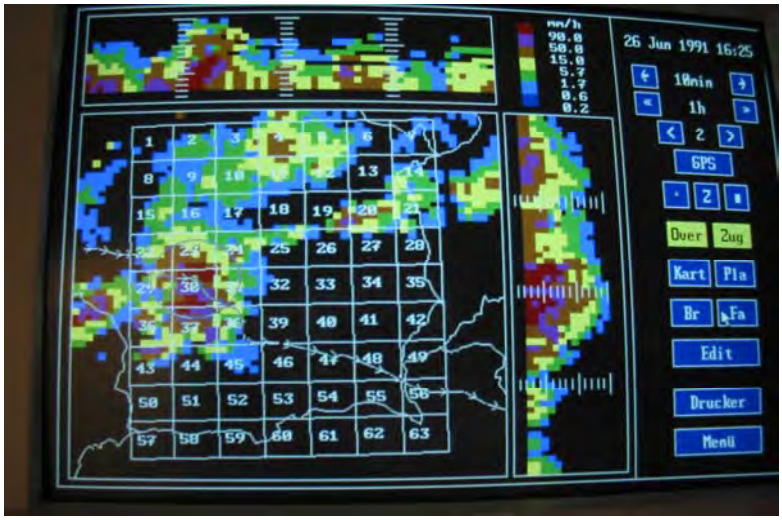


Abb.13.1: Radarbild aus dem „Hobiger-Programm“, zeigt alle 7 Intensitätsstufen, ein Gewitterzugpfad ist mit Hagelradius definiert, das Planquadratraster über die südliche Steiermark gelegt, an der rechten Seite sieht man Schaltknöpfe zur Einblendung der beseedeten (= mit AgJ geimpften) Gebiete durch Brenner bzw. Fackeln (Quelle: Bildschirm mit vom Autor eingegebenen Daten)

Im Jahre 1994 wurden vom Autor dieser Arbeit Änderungs- und Verbesserungsvorschläge hinsichtlich der Programmgestaltung gemacht, welche dann teilweise von Kurt Weninger in dessen im Juli 1997 veröffentlichter Diplomarbeit *„Analyse und statistische Bewertung von Wetterradar-, Hageleinsatz- und Hagelschadensdaten“* umgesetzt wurden. Dieses neu entwickelte Programm hatte als Basis das alte „Hobiger-Programm“, wurde also ebenfalls auf MS DOS-Basis programmiert und einige Dinge ergänzt. Weninger sah als eigenen Eingabepunkt GPS-Daten vor, was die Präzision der Ortsangabe des Aufenthalts der Hagelflugzeuge zu jedem beliebigen Zeitpunkt möglich machen würde. Wie in vorigen Kapiteln schon erwähnt, hatte dieses System jedoch technische Probleme und die verfügbaren Datenmengen waren völlig unzureichend. Ebenso wurden bei der Untersuchung der Gewitterzugpfade „Trends“ erstellt, die den zeitlichen Verlauf einiger Parameter der Zugpfade widerspiegelten und so deren Einteilung in Gruppen ermöglichen sollten. Weninger verwendete für seine Auswertung sämtliche verfügbare Daten der Jahre 1995 und 1996. Das Ergebnis war auch hier, dass durch fehlende Datensätze einerseits und die Ungenauigkeit der Angaben

[113] „European Centre for Medium Range Weather Forecast“ ist ein zentrales Wettervorhersagesystem für Mitteleuropa. Diese Daten standen jedoch nur lückenhaft zur Verfügung.

(Hagelmeldungen mittels Hagelkarten, Seeding-Reports) keine unmittelbaren Zusammenhänge zwischen AgJ-Ausbringung und Schadensreduktion ausgewiesen werden konnten.

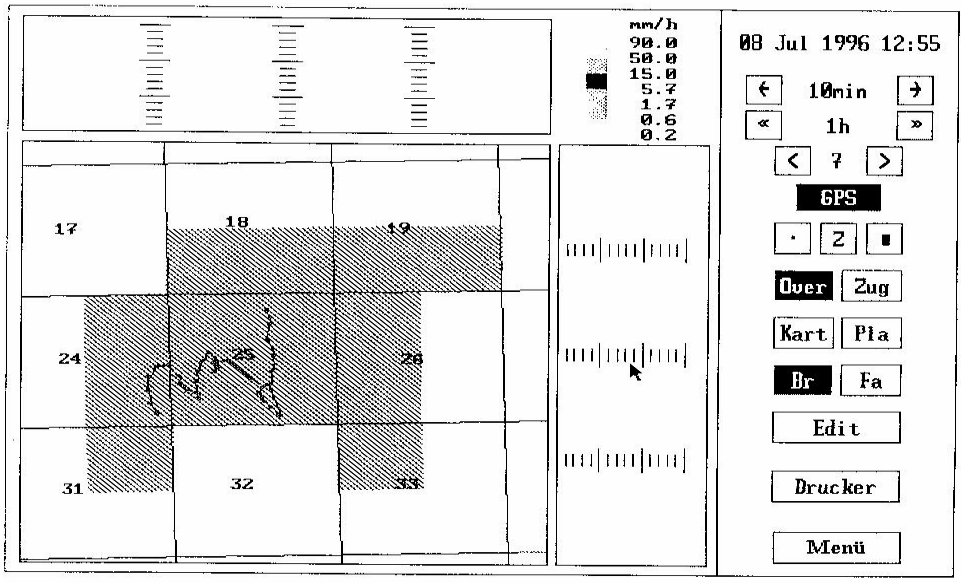


Abb.13.2: Ausschnitt des Radarschirms mit ausgeblendeten Intensitätsstufen, eingeblendetem Seeding-Bereich und der GPS-Route des Flugzeugs (aus: Weninger, 1997)

Basierend auf den beiden Diplomarbeiten von Bernhard Hobiger und Kurt Weninger war das Ziel einer weiteren Diplomarbeit von Michael Übeleis mit dem Titel *„Programmsystem für die vergleichende Analyse und Bewertung von Wetterradar-, Hagelbekämpfungs- und Hagelschadensdaten, Weiterentwicklung und Portierung auf Windows NT“* die alten Programme in das neuere Betriebssystem „Windows NT“ zu portieren und auch für dessen Nachfolgeprodukte („Windows 2000“ und „Windows XP“) nutzbar zu machen. Übeleis ließ inhaltlich vieles gleich, verbesserte aber die optische Gestaltung und den Bedienungskomfort entscheidend (siehe Abb.13.3). Der wesentliche Unterschied zu den alten Programmen lag auch in der datenbankgestützten Speicherung sämtlicher Daten. Auch die Ergebnisse von Übeleis‘ Arbeit (er verwendete sämtliche verfügbare Daten des Jahres 2000) sind aus denselben Gründen ähnlich ausgefallen wie jene der Vorgängerarbeiten. Für die Zukunft bildet dieses System jedoch gute Möglichkeiten, große Datenmengen zu verwalten und zu interpretieren.

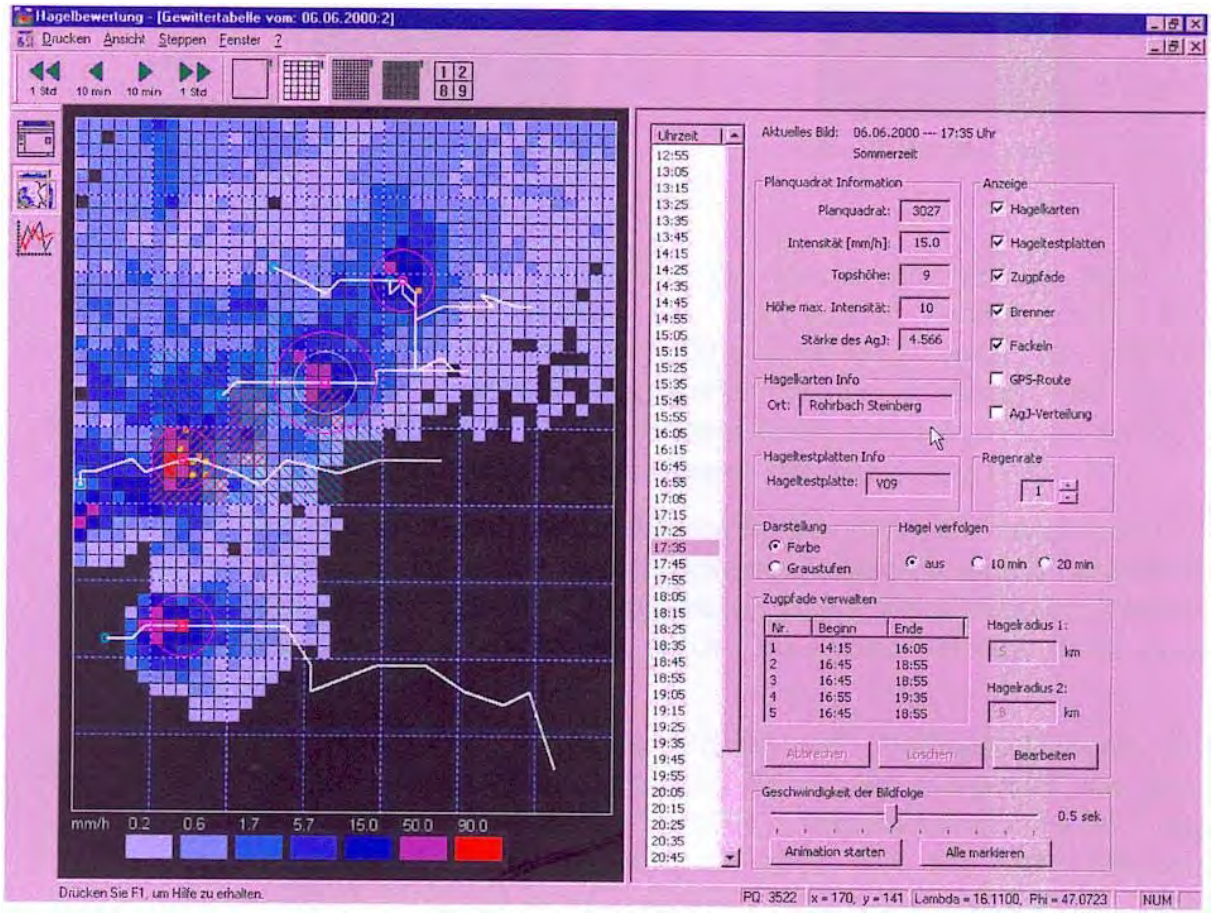


Abb.13.3: Darstellung des Radarschirms mit Bedienelementen im neuen „Übeleis-Programm“; Intensitäten, mehrere Zugpfade, Hagelkartenmeldungen, HTPs, Brenner und Fackelgebiete sind zu sehen. (aus: Übeleis, 2001)

14. Vernetzung der Einfluss- und Wirkungsgrundlagen anhand von Fallbeispielen

14.1. Arbeitsweise

Bereits im Jahre 1994 entstand im Rahmen einer werkvertraglichen Tätigkeit des Autors dieser Arbeit für die Steirische Hagelabwehrgenossenschaft der Idee, wissenschaftlich detailliert eine Effizienzanalyse der Hagelabwehr in der Steiermark und speziell der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft durchzuführen. In diesem Jahr wurden die Verbesserungsvorschläge für das erste Hagelbewertungsprogramm von B. Hobiger[114] erarbeitet, ein Jahr später diese nun vorliegende Dissertation konzipiert. Ursprünglich war das Ziel, anhand von „Zwillingsfällen“ im Zeitraum 1991 bis 2002 Vergleichstudien zwischen beseedeten (= beimpften) Gebieten und unbeseedeten (= unbeimpften) Gebieten durchzuführen. Im Zuge der Recherchen zur Datensammlung wurden alle verfügbaren Radarbilder des Untersuchungszeitraumes überprüft und verglichen. Dabei zeigte sich, dass es solche Zwillingsfälle nicht gibt. Einerseits fanden sich keine ähnlichen meteorologischen Gegebenheiten und andererseits entsprach und entspricht es nicht den Intentionen der Hagelabwehr, bestimmte Regionen im hagelgefährdeten Gebiet (auch aus wissenschaftlichen Vergleichsgründen) nicht zu impfen – der Schutz der Kulturpflanzen ist vorrangig. Daher ergaben sich nach Erfassung aller vorhandenen Daten drei Fälle, die sich hinsichtlich des Vorhandenseins von Radarhagel, Bodenhagel und Seeding unterschieden.

Fall	Datum	Radarhagel	Bodenhagel	Seeding	Anmerkung
1	26.06.1991	ja	ja	ja	Superzelle → Südost
2	23.08.1994	ja	nein	ja	Mehrzellengewitter mit starker Fluktuation der Zellkerne (4 Zugpfade ausgewiesen)
3	03.08.2002	ja	nein	nein	Nachtgewitter Weststeiermark - Graz

Tab. 14.1.: Gegenüberstellung aller Fallbeispiele nach Vorhandensein von Radarhagel, Bodenhagel und Seeding.

Einer der unten diskutierten Fälle ist ein Nachtgewitter, was veränderte meteorologische Bedingungen zur Folge hat, worauf später genauer eingegangen wird. Bei der Auswahl der

[114] siehe Kapitel 13

Fälle sei darauf verwiesen, dass gerade bei besonders „günstigen“ Hagelereignissen[115] das Wetterradar auf dem Zirbitzkogel durch Blitzschlag ausgefallen war und diese Fälle daher von vornherein ausschieden. Ursprünglich war auch daran gedacht, GPS-Daten zur Positionsbestimmung der Piloten zu berücksichtigen. Das System war jedoch so fehlerhaft, dass diese Daten nicht zur Verfügung standen. Weiters waren für viele Hagelereignisse keine oder zu wenige Gemeindemeldungen über Hagelschlag vorhanden. Jedenfalls sind die drei Fälle, die in Kapitel 14.2. diskutiert werden, jene, für die am meisten Daten zur Verfügung standen. Die Verfügbarkeit der Datensätze war für die Auswahl der Fälle die höchste Priorität, die zweithöchste war die Erfüllung der in Tab.14.1 dargestellten Kriterien, dritthöchste Priorität war die Unterschiedlichkeit der Gewittertypen- und Zugbahnen.

Im Zuge der Datenaufarbeitung stellte sich heraus, dass nicht alle in Kapitel 12 diskutierten Einfluss- und Wirkungsgrundlagen für die Diskussion der Fallbeispiele notwendigerweise heranzuziehen waren, da diese wenig bis gar keine wesentlichen Erkenntnisse zur Interpretation der Fälle geliefert hätten. So wird auf die Darstellung der Satellitenbilder verzichtet. Radiosondenaufstiege wurden nicht berücksichtigt, da die Daten nur für jeweils frühmorgendliche Aufstiege um 3 Uhr UTC zur Verfügung standen. Die Gewitterreports (Kapitel 12.2.1) standen nur in der Zeit vor der Verfügbarkeit von Radarbildern zur Verfügung (also vor 1990) und waren daher für diese Arbeit nicht relevant. Leider war es nicht möglich, umfangreiche Daten zu den Schadensfällen von der österreichischen Hagelversicherung zu bekommen, die die Herausgabe mit dem Verweis auf datenschutzrechtliche Gründe ablehnte.

Im Gegensatz zu vorherigen Studien wird in dieser Studie erstmals die Vernetzung von Einflussgrundlagen (Radarbild, Wetterlagenbericht, Seedingreport) und Wirkungsgrundlagen (Klimastationsdaten, Hageltestplattenauswertung, Gemeindemeldungen durch Hagelkarten, Schadensberichte) anhand konkreter Einzelhagelereignisse untersucht.

[115] „günstig“ aus der Sicht des Autors weil es sich um sehr intensive Hagelereignisse handelte, „günstig“ sicher nicht aus Sicht betroffener Landwirte

14.2. Fallstudien

14.2.1. Fall 1 – 26.06.1991

Bei diesem Fall gab es sowohl Radarhagel als auch Bodenhagel und auch Seeding (Beimpfung der Wolken) wurde durchgeführt. Im Anhang finden sich für dieses Fallbeispiel insgesamt 8 Dateiordner, die für den Zeitraum 12:25 – 18:55 Uhr MESZ Radarbilder des im Anschluss charakterisierten ersten Gewitterzugpfades mit den Faktoren Zugpfad, Hagelradius, Brenner, Fackeln, Bodenhagelmeldungen der Gemeinde („Kart“) und Hageltestplatten („Pla“) zeigen („260691_ges“). Für den unten nicht getrennt diskutierten zweiten Zugpfad mit den gleichen Faktoren - dieser Zugpfad wurde bei der Charakterisierung im Text nicht eigens ausgewiesen, da er sich mit der ersten Zelle vereinigte - wurde ein eigener Ordner erstellt („260691_Z2“). Der dritte Ordner zeigt wieder Radarbilder für den Zugpfad 1, allerdings ohne die Darstellung der Brenner und Fackeleinsätze, es sind also nur die Wirkungsgrundlagen „Gemeindemeldungen“ und „HTP“ zu sehen („260691_Kart_Pla“). Bei allen Radarbildern aller drei Ordner ist zwecks besserer Lesbarkeit das Radarbild erst ab Intensitätsstufe drei zu sehen. Weiters sind Radarbilderserien vom Wetterradar Schwechat („Sch 19910626“) und Zirbitzkogel („Zk 19910626“) vorhanden. Bilderserien von „260691 HTP Daten“, „260691 Karten Daten“ und „Seedingreports 260691“ zeigen die dann später im Text verarbeiteten Daten zu HTP-Meldungen, Hagelkartenmeldungen und Seedingreports als Fotos aus dem damaligen „Hobiger-Programm[116]“.

Einflussgrundlagen:

A. Wetterlagenbericht:

Diese nachfolgende Übersicht wurde direkt von der ZAMG übernommen:

Auszug aus dem Witterungsverlauf Juni 1991:

Datum	Wetterlage	
25. 26.	W h	Eine Störungszone zieht rasch über Österreich hinweg. Sie verursacht verbreitet Niederschläge. Noch im Verlauf des 25. lockert die Bewölkung von Westen her wieder auf. Es bleibt sommerlich warm; häufig wird bei Temperaturen bis 33 C in diesen Tagen der Monatshöchstwert verzeichnet. Am Nachmittag und Abend des 26. treten verbreitet heftige Gewitter auf.

[116] siehe Kapitel 13.1

Wetterlagen – Legende (komplette Aufstellung):

H = Hoch über West- und Mitteleuropa, **h** = Zwischenhoch, **Hz** = Zonale Hochdruckbrücke, **HF** = Hoch mit Kern über Fennoskandien, **HE** = Hoch mit Kern über Osteuropa, **N** = Nordlage, **NW** = Nordwestlage, **W** = Westlage, **SW** = Südwestlage, **S** = Südlage, **G** = Gradientschwache Lage, **TS** = Tief südlich der Alpen, **TwM** = Tief über dem westlichen Mittelmeer, **TSW** = Tief im Südwesten Europas, **TB** = Tief bei den Britischen Inseln, **TR** = Meridionale Tiefdruckrinne, **Tk** = Kontinentales Tief, **Vb** = Tief auf der Zugstraße Adria - Polen

B. Radarbilder:

Das untersuchte Gewitter fand in der Zeit von 10:25 – 16:55 Uhr UTC[117] (12:25-18:55 Uhr MESZ[118]) statt. Die Radarbilder der Wetterradars Zirbitzkogel und Schwechat sind durchlaufend im Zehnminutenintervall vorhanden, der vollständige Bildersatz befindet sich im Anhang. In der folgenden Radarbildcharakterisierung wird sowohl der Hauptgewitterzugpfad (Richtung Südost von Gleinalm kommend) als auch die im Anhang als „Z2“ titulierte „Nebenzelle“, die sich im Gebiet Stubenberg (PQs 19, 20) entwickelte, berücksichtigt. Die zur Verfügung stehende Intensitätsskala der Regenrate (Maß für die Radarreflektivität) ist 8 – stufig (siehe auch Kapitel 12.1.3).

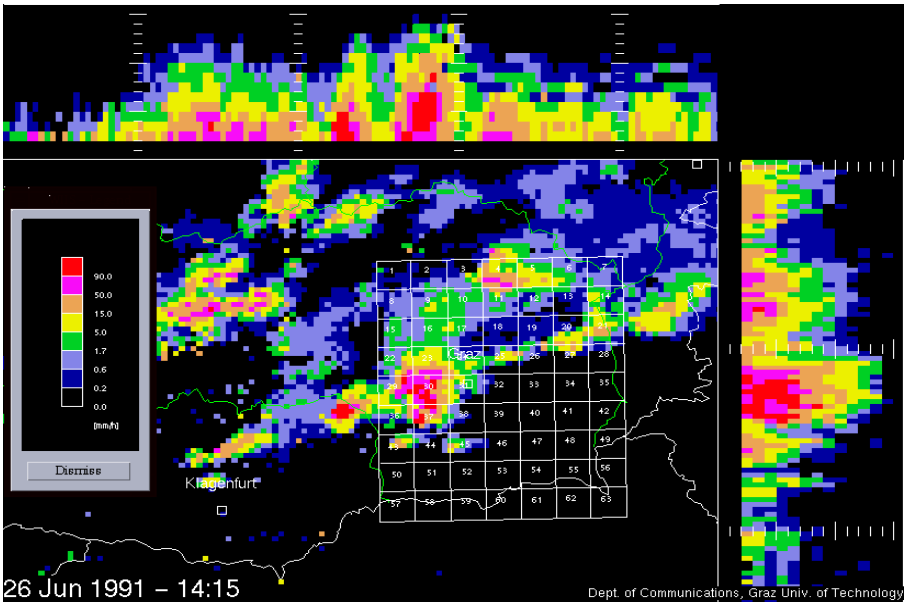


Abb. 14.1.: Radarbild (8-teilige Skala) des Wetterradars Zirbitzkogel um 16:15 MESZ, Grundriss, Seitenrisse, vgl. Abb. 12.4., zur Verfügung gestellt von der TU Graz

[117] UTC = Universal Time Coordinated (= GMT = Greenwich Mean Time = Londoner Zeit = MEZ – 1 Stunde)
[118] MESZ = Mitteleuropäische Sommerzeit (= UTC + 2 Stunden)

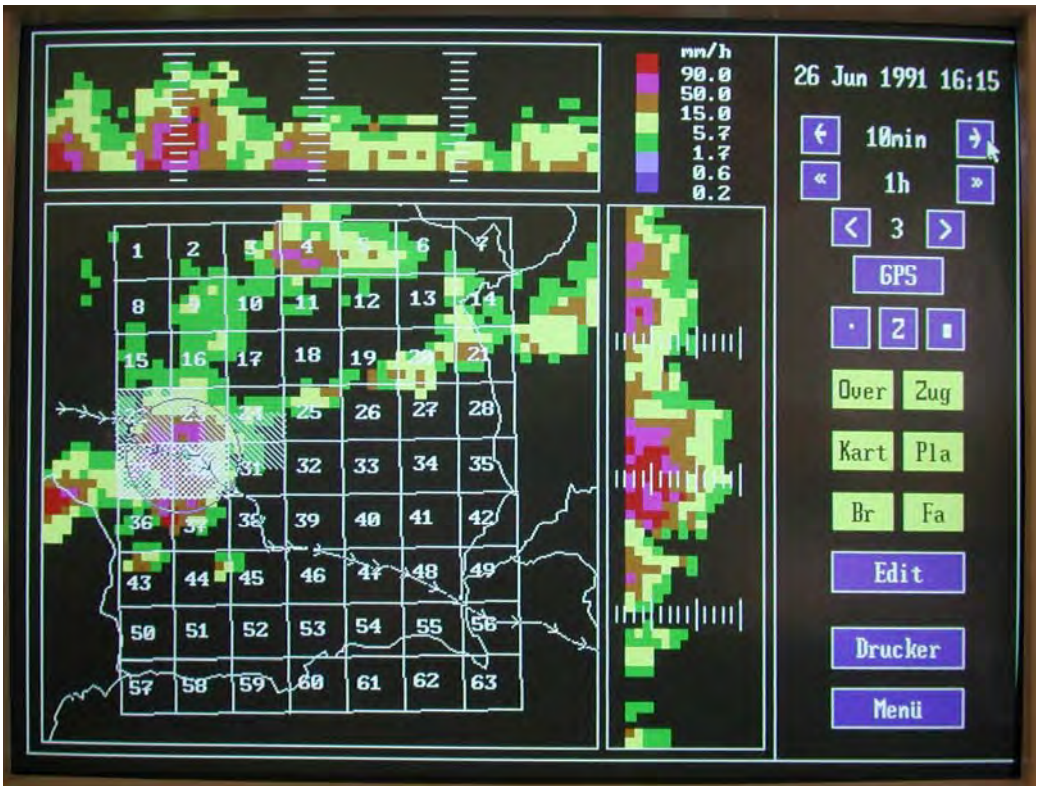


Abb. 14.2.: Radarbild vom Zirbitzkogel, das ins Hobiger / Weninger – Programm übernommen wurde mit im Vergleich zu Abb. 14.1 zusätzlicher Darstellung des Gewitterzugpfades, des Hagelradius‘ und der von der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft beseedeten Gebiete um 16.15 MESZ

Beschreibung der Gewitterentwicklung laut Radarbild (Wetterradar Schwechat, *Zirbitzkogel*):

Zeit (MESZ)	Planquadrat	Beschreibung
12:25		keine besonderen Vorkommnisse
12:35 – 13:55	15, 22	über der Gleinalpe entwickelt sich eine Gewitterzelle, lokal eng begrenzt, stationär, mit Topshöhen[119] von 13 km
14:05 – 14:25	- „ -	aus Nordost nähert sich eine kleine Zelle und vereinigt sich mit der Hauptzelle
14:35 – 15:05	15, 16, 22, 23	die Zelle verbreitert sich Richtung Osten, die dynamischen Vorgänge in der Wolke konzentrieren sich um einen relativ stationären Kern
15:15	17	ein zweiter wenig intensiver Kern bildet sich im Ostteil der Wolke
15:25	22, 23	Intensitätsrückgang im Bereich der Gewitterzelle
15:35	22, 23	Intensivierung der lokalen Zelle
15:45 – 16:05	22, 23, 29, 30, [4, 5, 6, 7, 13, 14, 20, 21]	Nachrücken einer weiteren konvektiven Zelle an der Rückseite aus WNW, im Nordosten des Planquadratrasters [...] (Wechselgebiet) bildet sich eine Kette von konvektiven Zellen
16:15	22, 23, 29, 30, 36, 37, [3, 4, 5, 13, 14, 20, 21]	die Zelle im Westen wächst dramatisch an, die höchsten Intensitäten liegen bei Stufe 5 (Regenrate 15 mm/h), die Zelle im Nordosten bewegt sich langsam Richtung Süden und nähert sich der nach Osten strebenden ersten Zelle; *die Zelle im Westen hat bereits Stufe 8 in PQ 30 erreicht, Stufe 7 (Regenrate 50 – 90 mm/h) umgibt ringförmig den*

[119] maximale Gewitterturmhöhe

		Zellenkern (in PQ 22, 23, 29, 30, 36, 37)
16:25	22, 23, 24, 29, 30, 36, 37, [19, 20, 21]	die beiden von Gleinalpe und Wechsel stammenden Zellsysteme stehen kurz vor der Vereinigung; erstmals größerflächig Intensitäten Stufe 6 (Regenrate bis 50 mm/h) in PQ[120] 22,23,29,30 und [19, 20] erreicht; *Zelle wie oben beschrieben verschiebt sich Richtung Südost, Intensitäten unverändert hoch*
16:35 – 16:45	23, 24, 30, 31, 37, 38, [19, 20, 21]	Zellen aus Westen bewegen sich weiter nach Osten (über Graz), Zellen im Osten bleiben (noch) stationär; Vereinigung ist bereits erfolgt; Intensitätsstufe 8 (Regenrate > 90 mm/h) in der Höhe von 5000 – 8000 m in PQ [19, 20] erreicht. *Letzteres im Radarbild Zirbitzkogel nicht zu sehen, dafür sieht man dort in der von Westen kommenden Hauptzelle nach wie vor „Int 8“*[121] *und „Int 7“ in PQ 38*
16:55 – 17:05	46, 39, 32, 25, 26, 27, 28	Intensitätsstufe 6 *(Int 8)* als Maximum; die nun vereinigten Zellen bilden eine sich nach Südost bewegende Gewitterfront (PQs siehe Spalte 2 von Süd nach Nord und Ost)
17:15 – 17:55	46; 47, 48, 54, 55	ein Kern an der Südflanke der Front intensiviert sich größerflächig auf Stufe 6 *(Int 8 in PQ 38, 39, 45, 46)* und zieht nach Südost weiter
18:05	48, 49, 55, 56	Intensitätsstufe 6 löst sich auf *(Int 8 nur noch in PQ 48 auf einer Pixelgröße = 2x2 km)*
18:15 – 18:55	48, 49, 55, 56, 62, 63	Die Front verlässt das Planquadratraster und bereits um 18:35 Österreich bei Radkersburg

Tab. 14.2.: Charakterisierung der Gewitterentwicklung laut Wetterradar Schwechat und *Zirbitzkogel*, chronologisch und mit Planquadratangabe

Es sei vermerkt, dass die für die Hagelbewertung inklusive Zugpfadsetzung zur Verfügung stehenden Radarbilder (siehe Anhang) vom Radar Zirbitzkogel stammen und nicht mit jenen des Radar Schwechat, die auch für obige Charakterisierung herangezogen wurden, ident sind. Das Radar Schwechat weist durch größere Abschattungseffekte wesentlich niedrigere Intensitäten aus. Die Radarbilder, die im Hobiger-Programm verwertet wurden, stammen vom Zirbitzkogel und weisen Intensitätswerte auf, die im Schnitt 2 Stufen über jenen von Schwechat liegen. Basierend auf diesen Zirbitzkogelbildern wurden vom Autor der vorliegenden Arbeit Zugpfade des Gewitterzellkerns gelegt, wobei das Zentrum des Zugpfades immer in einem Pixel mit Intensitätsstufe 8 gelegt wurde. Der für dieses Fallbeispiel interessante Zugpfad wurde jener Zelle zugeordnet, die sich über der Gleinalm entwickelt hatte. Daraus konnte auch anhand der Zugbahn die Bewegungsrichtung Nordwest – Südost bestimmt werden. Der um den Zellkern und damit Zugpfadszentralpunkt zeitweilig sichtbare Kreis ist der so genannte Hagelradius, der die maximale Entfernung gemeldeter Hagelschläge vom festgelegten Gewitterzentrum angibt. Die Bodenhagelmeldungen werden weiter unten im Rahmen der Diskussion der Wirkungsgrundlagen genauer besprochen.

[120] PQ = Planquadrat

[121] „Int 8“: Abkürzung für Intensitätsstufe 8

Kurzcharakteristik:

Über der Gleinalm im Nordwesten und über dem Wechsel im Nordosten bilden sich zeitversetzt zwei konvektive Gewitterzellensysteme, die sich aufeinander zu bewegen und sich schließlich vereinigen. Versucht man eine Typisierung der Gewitter, kann man am ehesten von zunächst Mehrzellengewittern sprechen, deren Kerne sich dann zu einer Superzelle vereinigen. Das gesamte System zieht nach Südost und verlässt Österreich bei Bad Radkersburg. Radarhagel ist durch das fast kontinuierliche Vorhandensein der Intensitätsstufen 7 und 8 gegeben.

C. Seedingreport:

Wie bei der Charakterisierung der Radarbilder oben soll nun ebenfalls in tabellarischer Form die Impftätigkeit der Hagelflugzeuge dokumentiert werden:

Zeit (MESZ)	Planquadratviertel	Kommentar
13:15 – 13:25	Brenner: 10/3, 10/4, 11/3	weit nordöstlich der Entwicklung hinter der Zelle
13:35 – 13:45	Brenner: 10/3, 10/4, 11/3; 16/1, 16/3, 16/4, 22/1, 22/2, 23/1, 23/2	Beimpfung erfolgt zeitgerecht in der Entwicklungsphase der Zelle
13:55	Brenner: 16/1, 16/3, 16/4, 22/1, 22/2, 23/1, 23/2	- „ -
14:05 – 14:55	Brenner: 16/1, 16/3, 16/4, 22, 23	Ausweitung der Beimpfung vor dem immer noch stationären Gewitterturm, der an Intensität verliert (Int 8 war nur um 14:05 gegeben)
15:05 – 15:15	Brenner: 22/3, 22/4, 23/3, 23/4, 29/1, 29/2, 30/1	Impfung erfolgt vor der Zellen (in Bewegungsrichtung gesehen)
15:25 – 15:35	Brenner: 22, 23/3, 23/4, 29, 30	Impfung vor der Zelle; hinter der beimpften Zelle entwickelt sich außerhalb dese PQ-Rasters im Bereich Stubalpe – Gaberl eine neue Zelle großer Intensität, diese konnte bislang unbehelligt wachsen
15:45 – 16:05	Brenner: 22, 23/3, 23/4, 29, 30 Fackeln: 29	der Kern der neuen Zelle liegt bereits in PQ 22, die Beimpfung erfolgt großräumig
16:15	Brenner: 22, 23/1, 23/4, 24/3, 24/4, 29, 30, 31/1, 31/2 Fackeln: 29, 30	Beimpfung im Einsatzgebiet der Genossenschaft flächendeckend, an der Südflanke (PQ 36, 37) keine Beimpfung mehr, da außerhalb des Einsatzgebietes
16:25	Brenner: 22, 23/1, 23/4, 24/3, 24/4, 29, 30, 31 Fackeln: 29/2, 29/3, 29/4, 30 Brenner (NO[122]): 19/3, 19/4, 20/3, 20/4 Fackeln (NO): 19/4	Beimpfung bleibt hinter der Zugbewegung etwas zurück, flächenmäßig gut; die zweite im Raum Stubenberg befindliche Zelle, die sich bereits auch bei Intensitätsstufe 3 mit der Zelle aus Westen vereinigt hat, wird

[122] NO = im Nordosten befindlich

		beimpft
16:35	Brenner: 15/4, 16/3, 22, 23/1, 23/4, 24/3, 24/4, 29, 30, 31, 37/2, 38/1, 38/2 Fackeln: 29/2, 29/3, 29/4, 30, 31; Brenner: 19/3, 19/4, 20/3, 20/4, 26/1, 26/2, 27/1, 27/2, 27/3 Fackeln: 19/4	die Beimpfung wurde ausgeweitet, sowohl für die Zelle im Westen als auch die im Nordosten
16:45	Brenner: 15/4, 16/3, 19/3, 19/4, 20/3, 20/4, 22, 23/1, 24/3, 24/4, 25/3, 25/4, 26/1, 26/2, 27/1, 27/2, 27/3, 29, 30, 31, 32/1, 32/2, 37/2, 38/1, 38/2 Fackeln: 19/4, 29/2, 29/3, 29/4, 30, 31	Beimpfung im Einsatzgebiet flächendeckend entlang der nun bestehenden gesamten Front aus den vereinigten Zellen aus West und Nordost; die Planquadratangaben werden wegen der Zellverschmelzung ab sofort nicht mehr nach unterschiedlichen Zellen getrennt angeführt
16:55	Brenner: 15/4, 16/3, 19/3, 19/4, 20/3, 20/4, 22/2, 23/1, 24/3, 24/4, 25/3, 25/4, 26/1, 26/2, 26/4, 27/1, 27/2, 27/3, 30, 31, 32, 33, 37/2, 38/1, 38/2, 39/1, 40 Fackeln: 19/4, 30/2, 30/4, 31, 32/1, 32/3	weitere Ausweitung der Beimpfung, der Kern der Hauptzelle bewegt sich außerhalb der Südgrenze des Einsatzgebietes Richtung Südost.
17:05	Brenner: 15/4, 16/3, 18/3, 19/3, 22/2, 23/1, 24/3, 24/4, 25/3, 25/4, 26/1, 26/2, 26/4, 27/1, 27/2, 27/3, 30/2, 30/4, 31, 32, 33, 37/2, 38/1, 38/2, 38/4, 39/1, 39/2, 40 Fackeln: 25/4, 31, 32, 38/2, 39/1	Beimpfung weiter intensiv und großflächig, Beimpfung im Nordwesten (PQ 15, 16) an der Rückseite nicht mehr notwendig
17:15	Brenner: 15/4, 16/3, 18/4, 19/3, 24/3, 24/4, 25/3, 25/4, 26/2, 26/3, 26/4, 27/1, 27/2, 27/3, 30/2, 30/4, 31, 32, 33, 37/2, 38/1, 38/2, 38/4, 39/1, 39/2, 40 Fackeln: 25/4, 26/2, 26/3, 31, 32, 33, 38/2, 39/1	Hauptzelle bereits ohne Beimpfung, da außerhalb des Einsatzgebietes; im Einsatzgebiet an der Rückseite des Gewitters flächendeckende Beimpfung
17:25	Brenner: 15/4, 16/3, 18/4, 19/3, 25/3, 25/4, 26/2, 26/3, 26/4, 27/1, 27/2, 27/3, 30/2, 30/4, 31, 32, 33, 37/2, 38/1, 38/2, 38/4, 39/1, 39/2, 40 Fackeln: 25/4, 26/3, 32, 33, 38/2, 39/1	Zugbahn weiter Richtung Südost, Beimpfung wie oben
17:35	Brenner: 18/4, 19/3, 25/2, 25/3, 25/4, 26/1, 26/2, 26/3, 27/3, 31/2, 31/4, 32, 33, 38/2, 38/4, 39/1, 39/2, 40 Fackeln: 25/4, 26/3, 32, 33	erst jetzt keine Impfung in PQ 15,16; ansonsten flächendeckend im Einsatzgebiet. Hauptkern in PQ 47 sich in Richtung Radkersburg bewegend
17:45	Brenner: 18/4, 19/3, 25/2, 26/1, 26/2, 26/3, 27/3, 31/2, 31/4, 32, 33, 38/2, 38/4, 39/1, 39/2, 40 Fackeln: 26/3, 33	Beimpfung erfolgt an der Gewitterrückseite, da die Vorderseite bereits außerhalb des Einsatzgebietes ist
17:55	Brenner: 18/4, 19/3, 25/2, 26/1, 26/2, 26/3, 27/3, 32/1, 32/4, 33, 40/1	Beimpfung geht zurück, da sich die Superzelle bereits in PQ 48 befindet, kein Fackel-Einsatz mehr
18:05	Brenner: 25/2, 26/1, 26/2, 26/3	Superzelle verlässt bei Bad Radkersburg Österreich
18:15 – 18:55	-	Zelle löst sich auf

Tab. 14.3.: Chronologischer Ablauf der Seedingtätigkeit am 26.6.1991 nach Planquadraten

Dieses Gewitterereignis zog eine der umfangreichsten Hagelabwehreinsätze der letzten 20 Jahre nach sich. Insgesamt wurden 7 Einsätze geflogen. Insgesamt waren 4 Flugzeuge (heute stehen nur noch 3 zur Verfügung) im Einsatz. Insgesamt wurden 344 l AgJ-Lösung (6%ig) ausgebracht und 14 Fackeln abgebrannt.[123] Die Aufzeichnungen der Piloten werden im Folgenden wiedergegeben[124]:

Einsatz 1:
Nr. 41, Einsatzgebiet Reicherhöhe, Gewitterzugrichtung: O
Flugzeit: 13.02 – 15.11 Uhr (Dauer: 2:09 h),
Generatorbrenndauer: 13:12 – 15:00 (Dauer: 1:48 h)
AgJ-Verbrauch: 50 l Wolkenbasis: 4200 ft (≈ 1400 m) Temp.: +19°C in 3800 ft
Flugbereiche: 13:12 – 13:30: 10/3, 10/4, 11/3 Aufwind: 200 – 400 ft/s
13:30 – 15:00: 16/1, 16/3, 16/4, 223/1, 23/2 Aufwind: 200 – 400 ft/s

Einsatz 2:
Nr. 42: Einsatzgebiet Reicherhöhe, Gewitterzugrichtung: S
Flugzeit: 13:20 – 16:02 Uhr (Dauer: 2:42 h)
Generatorbrenndauer: 13:32 – 15:48 (Dauer: 2:16 h)
AgJ-Verbrauch: 60 l Wolkenbasis: 5200 ft Temp.: 16°C in 5000 ft
Flugbereiche: 13:32 – 14:00: 22/1, 22/2, 23/1, 23/2 Aufwind: 300 – 500 ft/s
14:00 – 14:30: 22, 23 Aufwind: 300 – 500 ft/s
14:30 – 15:00: 22/3, 22/4, 23/3, 23/4 Aufwind: 300 – 500 ft/s
15:00 – 15:30: 22/3, 22/4, 23/3, 23/4,
29/1, 29/2, 30/1 Aufwind: 500 – 700 ft/s
15:30 – 15:48: 23/3, 23/4 Aufwind: 500 – 700 ft/s

Einsatz 3:
Nr. 43: Einsatzgebiet Reicherhöhe Gewitterzugrichtung: SSO
Flugzeit: 15:13 – 17:38 Uhr (Dauer: 2:25 h)
Generatorbrenndauer: 15:25 – 17:30 (Dauer: 2:05 h)
AgJ-Verbrauch: 60 l Wolkenbasis: 3000 – 5000 ft Temp.: 18°C in 4000 ft
4 Fackeln: 15:40: 29,
16:15: 30, 29/2, 29/3, 29/4,
16:40: 31,
17:08: 32
Sonstiges: Landung in Fürstenfeld, starke Turbulenzen über Graz
Flugbereiche: 15:25 – 15:55: 29, 22, 30 Aufwind: 200 – 1000 ft/s
15:55 – 16:25: 30, 29, 22 Aufwind: 200 – 2000 ft/s
16:25 – 16:55: 24/3, 24/4,
31, 30/2, 30/4 Aufwind: 200 – 2000 ft/s
16:55 – 17:30: 31/2, 31/4, 32,
33, 40 Aufwind: 500 – 2000 ft/s

[123] Pro Fackel werden ca. 12 g reines AgJ und insgesamt 150 g Pyromischung verbrannt.
[124] Im Anhang findet sich ein Dateiordner mit den Seedingreport-Daten im Hobiger-Programm

Einsatz 4:
Nr. 44: Einsatzgebiet ohne Angabe Gewitterzugrichtung: SSW
Flugzeit: 15:36 – 17:30 Uhr (Dauer: 1:54 h)
Generatorbrenndauer: 15:45 – 17:25 Uhr (Dauer: 1:40 h)
AgJ-Verbrauch: 50 l Wolkenbasis: 4500 ft Temp.: 18°C in 4000 ft
2 Fackeln: 17:00: 25/4,
17:10: 26/3
Flugbereiche: 15:45 – 16:15: 23/4 Aufwind: 300 ft/s
16:15 – 16:45: 24/3, 24/4, 31/1, 31/2 Aufwind: 300 ft/s
16:45 – 17:15: 25/3, 25/4, 32/1, 32/2 Aufwind: 800 ft/s
17:15 – 17:25: 26/3, 33/1, 33/2 Aufwind: 800 ft/s

Einsatz 5:
Nr. 45. Einsatzgebiet ohne Angabe Gewitterzugrichtung: SSO
Flugzeit: 15:44 – 17:47 Uhr (Dauer: 2:03 h)
Generatorbrenndauer: 16:00 – 17:40 Uhr (Dauer: 1:40 h)
AgJ-Verbrauch: 50 l Wolkenbasis: 4500 ft Temp.: 16°C in 4500 ft
Flugbereiche: 16:00 – 16:30: 22/2, 23/1 Aufwind: 300 ft/s
16:30 – 17:00: 15/4, 16/3 Aufwind: 300 ft/s
17:00 – 17:30: 18/4, 19/3 Aufwind: 500 - 600 ft/s
17:30 – 17:40: 25/2, 26/1, 265/2, 26/3 Aufwind: 500 – 600 ft/s

Einsatz 6:
Nr. 46: Einsatzgebiet ohne Angabe Gewitterzugrichtung: O
Flugzeit: 15:52 – 17:33 Uhr (Dauer: 1:41 h)
Generatorbrenndauer: 15:59 – 17:23 Uhr (Dauer: 1:24 h)
AgJ-Verbrauch: 40 l Wolkenbasis: 3300 – 4600 ft Temp.: 18°C in 4000 ft
4 Fackeln: 16:14: 30
16:25: 30
16:38: 31, 38/2
16:54: 32/1, 32/3, 38/2, 39/1
Flugbereiche: 15:59 – 16:30: 30 Aufwind: 1000 – 2000 ft/s
16:30 – 17:00: 30/2, 30/4, 37/2,
31/1, 31/3, 38/1 Aufwind: 1400 – 2000 ft/s
17:00 – 17:23: 38/2, 38/4, 32/3, 39/1,
32/4, 39/233/1, 33/2 Aufwind: 1400 – 2000 ft/s

Einsatz 7:
Nr. 47: Einsatzgebiet Hofkirchen
Flugzeit: 16:20 – 17:41 Uhr (Dauer: 1:21 h)
Generatorbrenndauer: 16:23 – 17:30 Uhr (Dauer: 1:07 h)
AgJ-Verbrauch: 34 l Wolkenbasis: 4200 ft Temp.: 18°C in 4000 ft
4 Fackeln: 16:29: 19/4
16:35: 26/1
16:58: 26/4
17:13: 33
Flugbereiche: 16:23 – 16:30: 19/3, 19/4, 20/3, 20/4 Aufwind: 1000 – 1500 ft/s
16:30 – 17:00: 26/2, 27/1, 27/2, 27/3 Aufwind: 1000 – 1500 ft/s
17:00 – 17:30: 32/1, 32/4, 33, 27/3, 40/1 Aufwind: 1000 – 1500 ft/s
17:00 – 17:30: 27/3, 40/1 Aufwind: 1000 – 2000 ft/s

Wirkungsgrundlagen für Fall 1 – 26. 06. 1999:

Für die Charakterisierung dieses Falles liegen Daten von Gemeindemeldungen und Hagel-testplatten sowie Klimastationsdaten im Gewittereinzugsgebiet vor, die nachstehend angeführt sind.

A. Klimastationen:

Die im Gewittereinzugsbereich liegenden Klimastationen liefern folgende Daten (hier für den 26.06.1991), wobei diese und auch jene für die Fälle 2 und 3 von der ZAMG Regionalstelle Graz – Thalerhof zur Verfügung gestellt wurden[125]:

name	istnr	tmin	tmax	t7	t14	t19	t	nied19	nied19a	nied	nieda
ST.MICHAEL B. LEOBEN	13250	131	283	166	219	183	207	66	Regen	168	Regen
BRUCK/MUR	13301	142	285	163	256	186	214	60	Regen	100	Regen
RECHBERG	13400	162	240	188	200	162	201	38	Regen	129	Regen
BIRKFELD	13500	134	264	149	259	183	199	8	Regen	44	Regen
FISCHBACH	13510	146	231	176	221	162	189	132	Regen	132	Regen
ALTENBERG/HARTBERG	13600	169	281	200	280	188	225	220	Regen	232	Regen
KIRCHBERG-GRAFENDORF	13610	161	275	192	210	188	218	62	Regen	70	Regen
LOBMING	16300	163	284	193	280	202	224	106	Regen	141	Regen
GRAZ-FLUGHAFEN	16400	177	290	202	284	203	234	456	Hagel+ Regen	527	Hagel+ Regen
GRAZ-MESSENDORFBERG	16401	187	282	207	278	198	235	325	Regen	395	Regen
ST.RADEGUND	16411	161	260	195	256	179	211	60	Regen	130	Regen
GRAZ-UNIVERSITAET	16412	179	289	206	282	202	234	266	Regen	309	Regen
SCHOECKL	16420	136	195	154	180	150	166	57	Regen	143	Regen
GLEISDORF	16500	114	297	202	268	200	206	234	Regen	275	Regen
LASSNITZHOEHE	16511	170	275	203	271	185	223	254	Regen	318	Regen
WEIZ	16520	172	284	202	272	196	228	168	Regen	204	Regen
FUERSTENFELD	16600	165	290	174	278	198	228	16	Regen	16	Regen
DEUTSCHLANDSBERG	18900	165	315	202	290	188	240	320	Regen	442	Regen
LEIBNITZ	19000	170	311	194	302	197	241	8	Regen	60	Regen
BAD GLEICHENBERG	19201	168	300	186	297	194	234	238	Hagel+ Regen	284	Hagel+ Regen
WIEL	20600	152	244	182	238	158	198	32	Regen	272	Regen
BAD RADKERSBURG	20900	177	306	178	293	198	242	178	Regen	178	Regen

Tab. 14.4: Klimastationsdaten der Stationen, die im Gewittereinzugsgebiet lagen, zur Verfügung gestellt von der ZAMG- Regionalstelle Graz - Thalerhof

Legende zu Tab. 14.4.: **name** = Stationsname, **istnr** = Stationsnummer, **tmin** = Minimum-temperatur, **tmax** = Maximumtemperatur, **t14** = Temp. um 14 Uhr, **t19** = Temp. um 19 Uhr, **t** = Tagesmitteltemp., **nied19** = Niederschlag 19 Uhr in mm, **nied19a** = Niederschlagsart 19 Uhr, **nied** = Tagesniederschlag in mm, **nieda** = Niederschlagsart

[125] Die Daten der Klimastationen dienen der Bestätigung der Niederschlagsart und brachten keine neuen Erkenntnisse. Darum wird in den Diskussionen in Kapitel 15 nicht eigens auf deren Daten eingegangen.

B. Hageltestplatten:

Das Testplattenprogramm von O. Svabik ist ein wichtiges Element der Analysearbeit für die vorliegende Studie. Tab. 14.5 zeigt die getroffenen Testplattenstationen im Gebiet STK und im Gebiet RAD (siehe auch Kapitel 12.2.3) am 26.6.1991 mit Angabe der Stationsnummer, der Treffer auf Deckplatte (D) und den vier Seitenplatten (N, S, O, W), der Korngrößenverteilung, der Auftreffwinkel, der Einschlagsrichtung und der Auftreffenergien.

Nachfolgend die Aufstellung der getroffenen HTPs gemäß den Angaben und der Auswertung der ZAMG Wien. Eine weitere Auflistung stellt jene Daten dar, die direkt den HTP-Karten entnommen wurden. Ein Muster dieser Karten, die von den Stationsbetreuern zunächst an die Steirische Hagelabwehrgenossenschaft gesandt und von dort weiter an die ZAMG geschickt werden, ist in Kapitel 12.2.3 dargestellt (vgl. Abb. 12.11).

STK				Abdrücke					Korndurchmesser, in mm (auf D)							
Region	Station		Datum	D	N	S	O	W	5	10	15	20	25	alpha°	aus Richtung	Ealpha,ges(J/m²)
STK	A	9	910626	901	1376	37	0	0	850	51				45	nord	65
STK	V	5	910626	229	0	0	59	43	179	50				20	ost	29
STK	V	6	910626	103	192	0	0	0	62	36	3	1	1	45	nord	69
STK	V	7	910626	325	426	0	136	0	260	62	3			45	nordost	58
STK	V	8	910626	110	113	27	42	24	86	20	3	1		45	nordost	35
STK	V	9	910626	36	156	39	92	0	23	12	1			45	nordost	12

Region	Station		Datum	D	N	S	O	W	5	10	15	20	25	alpha°	aus Richtung	Ealpha,ges(J/m²)
RAD	R	4	910626	201	340	11	19	205	64	95	37	5		45	nordwest	229
RAD	R	10	910626	32	296	29	0	0	6	22	4			45	nord	27
RAD	R	11	910626	0	58	28	79	59							nordost	-1
RAD	R	12	910626	70	256	0	0	74	51	16	3			45	nordwest	22
RAD	R	16	910626	18	67	0	0	0	17	1				45	nord	1
RAD	R	20	910626	24	216	0	0	0	15	7	2			45	nord	11
RAD	R	21	910626	185	408	23	468	86	151	24	9	1		45	nordost	59
RAD	R	25	910626	32	51	26	39	213	28	4				45	west	4
RAD	R	29	910626	49	131	27	31	61	18	23	8			45	nordwest	40

Tab. 14.5: Auswertung der HTP-Stationen für den 26.06.1991 im Gebiet STK und RAD, für Deckplatte und Seitenplatten, Kornklassenspektren, Einschlagswinkel und Richtung der Hagelkörner, sowie Auftreffenergie pro m² (aus: O. Svabik, 2004)

Nachstehende Aufstellung wurde nach Informationen der Originalkarten erstellt.

Getroffene Platten im Gebiet STK: A09, V04, V05, V06, V07, V08

Alle Stationen liegen im Einsatzgebiet der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft.

HTP Nr.	Position (PQ-Pixel[126], Gemeinde)	Uhrzeit (MESZ)	Schlossengröße[127]	Art	Kultur	Schaden [%]
A09	1947 (Puch b. Weiz – Ost)	17:00 – 17:10	Erbsen (2)	trocken	Mais	50
V04	2347 (Eisbach – Süd)	16:25 – 16:35	Erbsen (2)	trocken	Mais	25
V05	3013 (Eisbach – Süd)	16:30 – 16:35	Nuss (4)	wässrig	Mais	50
V06	3012 (Stiwoll – Süd)	16:15 – 16:30	Marillenkern (3)	trocken	Mais	50
V07	3016 (St. Bartholomä–Nord)	16:00 – 16:30	Erbsen (2)	wässrig	Mais	25
V08	3027 (Rohrbach/Stb.–West)	16:30 – 16:40	Marillenkern (3)	wässrig	Mais	25

Tab. 14.6.: Am 26.6.1991 getroffene HTP's im Gebiet STK, (Tabelleninhalt selbsterklärend)

Getroffene Platten im Bereich RAD: R03, R09, R10, R18, R19, R22, R24, R28, R29, R41.

Alle Stationen liegen außerhalb des Einsatzgebietes der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft, das Gebiet wird von der Firma „Südflug" hagelabwehrtechnisch beflogen.

HTP Nr.	Position (PQ-Pixel, Gemeinde)	Uhrzeit (MESZ)	Schlossengröße	Art	Kultur	Schaden [%]
R03	4743 (Bierbaum – Ost)	17:30 – 17:45	Nuss (4)	trocken	Mais	99
R09	4745 (St.Peter/O. – Nord)	18:00 - 18:10	Nuss (4)	trocken	Mais	25
R10	4746 (St. Peter/O. – Nord)	17:30 – 17:35	Marillenkern (3)	trocken	Mais	k.A.
R18	4837 (Deutsch Goritz–Nord)	17:55 – 18:05	Nuss (4)	trocken	Mais	25
R19	4838 (Straden – West)	18:00 –18:05	Nuss (4)	trocken	Mais	0
R22	4848 (Tieschen – West)	18:00 – 18:10	Nuss (4)	trocken	Mais	0
R24	5413 (Weinburg a.S.–Nord)	18:00 – 18:05	Erbsen (2)	wässrig	Mais	25
R28	5513 (Hof b. Straden–Nord)	17:50 – 18:00	Taubeneier (5)	trocken	Mais	25
R29	5521 (Hof b. Straden – Ost)	17:55 – 18:05	Nuss (4)	trocken	Mais	k.A.
R41	5522 8Tieschen – Süd)	17:45 – 17:55	Nuss	trocken	Mais	k.A.

Tab. 14.7.: Am 26.6.1991 getroffene HTP's im Gebiet RAD, (Tabelleninhalt selbsterklärend)

[126] ein Pixel hat die Fläche 2 mal 2 Kilometer (genauer erläutert in Kapitel 12.2.3)

[127] Eine 6-teilige Skala mit ansteigender Korngröße wird verwendet, beginnend von der Kleinsten:
1) Reis, 2) Erbsen, 3) Marillenkern, 4) Nuss, 5) Taubeneier, 6) größer

Beim Vergleich der von der ZAMG ausgewerteten Daten und der Original-Karten fällt auf, dass die HTP-Stationsnummern nicht übereinstimmen. Nachstehende Gegenüberstellung soll dies verdeutlichen:

Gebiet STK:						
ZAMG	A09	V05	V06	V07	V08	V09
Original	A09	V04	V05	V06	V07	V08

Gebiet RAD:											
ZAMG	R04	R10	R11	R12	R16	R20	R21	R25	R29		
Original	R03	R09	R10		R18	R19	R22	R24	R28	R29	R41

Tab. 14.8.: Gegenüberstellung der ZAMG-Daten und der Daten der HTP-Karten

Die jeweils untereinander stehenden Stationsnummern von „ZAMG“ und „Original“ stimmen nur in einem Fall überein. Die Energiewertberechnungen zeigen jedoch, dass die jeweiligen Paare die selben Stationsnummern bezeichnen. Offenbar muss es hier zu Benennungsfehlern gekommen sein. Die Stationen ohne „Partner“ haben keine jeweilige Entsprechung. Für sie gibt es auch keine Energiewertberechnungen.

C. Hagelkarten:

Die Hagelkarten werden nach entsprechenden Bodenhagelereignissen von ehrenamtlichen Hagelbeobachtern ausgefüllt und an die Steirische Hagelabwehrgenossenschaft gesandt. Ein Muster dieser Karten wird in Kapitel 12.2.3 gezeigt (vgl. Abb.12.12). Die Hagelgewitter am 26.6.1991 verursachten großflächig Hagelschläge, wobei insgesamt 30 Gemeinden Bodenhagel meldeten.

Von den nachstehend aufgelisteten 30 Hagelmeldungen liegen nur folgende 6 im Einsatzgebiet der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft: 6, 11, 20, 22, 24, 26. Diese sind in der Tabelle *kursiv* gedruckt.

Nr.	Gemeinde	Bezirk, PQV[128]	Uhrzeit (MESZ)	Schlossengröße	Art	betroffene Fläche [ha]	Gewitter-zugrichtung
1	Allerheiligen b. Wildon	LB 39/3	16:30 – 16:45	Marillenkern (3)	wässrig	2000	N→S
2	Bairisch Kölldorf	FB 48/2	18:00 – 18:05	Erbsen (2)	wässrig	632	SO→NW
3	Bierbaum	RA 47/4	17:30 – 17:40	Nuss (4)	trocken	k.A.	N→S
4	Breitenfeld	LB 46/2	17:00 – 17:25	Marillenkern (3), Nuss (4)	wässrig	450	NW→O
5	Dietersdorf (Nord)	RA 47/4	17:40 – 18:00	Erbsen (2), Nuss (4)	trocken	450	N→S
6	*Eisbach (Süd, West)*	*GU 23/3, 23/4*	*16:25 – 16:35*	*Erbsen (2)*	*wässrig trocken*	*k.A.*	*NW→S*
7	Glojach	FB 47/1	17:30 – 18:00	Erbsen (2), Marillenkern (3)	wässrig trocken	348	N→S
8	Hengsberg (Süd)	LB 45/2	16:00 – 16:03	Erbsen (2), Marillenkern (3)	matschig	30	N→S
9	Heiligenkreuz a.W.	LB 39/1, 39/2	17:00 – 17:30	Reis (1), Erbsen (2)	wässrig	k.A.	W→O
10	Jagerberg	FB 47/1	18:00 – 18:15	Erbsen (2), Marillenkern (3)	trocken	3000	NW→SO
11	*Judendorf-Straßengel (Süd, West)*	*GU 23/4, 30/2*	*16:30 – 16:35*	*Erbsen (2)*	*wässrig*	*k.A.*	*NW→S*
12	Kapfenstein	FB 48/2	18:10 – 18:13	Erbsen (2), Marillenkern (3)	wässrig	k.A.	W→O
13	Krusdorf (Süd)	FB 48/1	17:52 – 18:00	Marillenkern (3)	wässrig	300	NW→SO
14	Mellach (Süd)	GU 39/1, 39/3	17:30 – 18:00	Marillenkern (3), Nuss (4)	trocken	400	S→O
15	Merkendorf	FB 48/2	18:00 – 18:10	Erbsen (2)	wässrig	1121	N→S
16	Mettersdorf am Saßbach (Nord)	RA 47/3	17:00 – 17:05	Erbsen (2)	trocken	k.A.	S→N
17	Mitterlabill	FB 46/2	17:20 – 17:50	Taubeneier (5)	wässrig	700	NW→SO
18	Poppendorf	FB 48/1	18:00 – 18:05	Erbsen (2), Marillenkern (3)	trocken	150	W→O
19	Raning	FB 47/2, 48/1	17:30 – 17:45	Nuss (4)	wässrig	k.A.	k.A.
20	*Rohrbach Steinberg (Nord)*	*GU 30/2, 30/4*	*16:10 – 16:20*	*Marillenkern (3)*	*trocken*	*50*	*N→S*
21	Schwarzau im Schwarzautal	FB 46/2, 47/1	17:30 – 18:00	Marillenkern (3)	trocken	1000	W→O
22	*Södingberg (Süd)*	*VO 29/2*	*17:00 – 17:06*	*Marillenkern (3)*	*wässrig*	*k.A.*	*N→S*

[128] PQV = Planquadratviertel (Fläche: 6 mal 6 Kilometer)

23	St. Anna am Aigen (Süd, West)	FB 48/4	17:30 – 17:35	Erbsen (2)	wässrig	500	N→S
24	*St. Bartholomä*	*GU 30/1*	*16:15 – 16:27*	*Erbsen (2), Marillenkern (3)*	*trocken*	*k.A.*	*NW→SO*
25	St. Georgen	LB 46/1	17:00 – 17:25	Marillenkern (3), Nuss (4), Taubeneier (5)	trocken	1388	W→O
26	St. Oswald b. Plankenwarth	GU 30/1, 30/2	16:15 – 16:35	Erbsen (2), Marillenkern (3)	wässrig	k.A.	N→S
27	Straden (Nord)	RA 48/3	18:05 – 18:15	Erbsen (2), Marillenkern (3)	wässrig	k.A.	N→S
28	Trössing	RA 48/3	17:30 – 17:55	Nuss (4), Taubeneier (5)	trocken	415	W→O
29	Weitendorf (Ost, Süd)	LB 38/4, 45/2	17:00 – 17:30	Nuss (4)	trocken	400	N→S
30	Wildon	LB 45/2, 46/1	16:45 – 16:53	Marillenkern (3), Nuss (4)	wässrig, trocken	723	S→N

Tab. 14.9.: Hagelkarten (Gemeindemeldungen) vom 26.9.1991, Inhalt selbsterklärend

D. Schadensmeldungen:

Da sich die österreichische Hagelversicherung mit Hinweis auf datenschutzrechtliche Gründe weigert, detaillierte Hagelschadensdaten zum jeweiligen Gewitterereignis zur Verfügung zu stellen, kann nur auf die in Punkt 12.2.5. angegebenen Schadensdaten zurückgegriffen werden. Für das Jahr 1991 stellt die ÖHV[129] eine bezirksweise Aufstellung über Prämien und Schadensleistungen zur Verfügung. Im Raum Deutschlandsberg (der allerdings außerhalb des Einsatzgebietes der steirischen Hagelabwehrgenossenschaft liegt), wurden 1991 29.215 € an Hagelversicherungsprämien bezahlt, für Schadensfälle wurden 15.566 € ausgegeben. Im Raum Gleisdorf wurden 1991 84.827 € an Prämien bezahlt, 93.739 € wurden für Schadensfälle aufgewendet.

14.2.2. Fall 2 – 23.08.1994

Bei diesem Fallbeispiel wird ein Gewitterzugpfad verfolgt, der Radarhagel zeigt und bei dem ein Seeding auch mit Fackeleinsatz durchgeführt wurde. Für diese Gewitterzelle wurde kein Bodenhagel registriert, für eine weitere Zelle, die nicht mit Fackeln "behandelt" wurde, wurde Bodenhagel registriert. Im Anhang finden sich Radarbilderserien der TU-Graz von den Wetterradars Schwechat („Sch 19940823") und Zirbitzkogel („Zk 19940823"). Weitere 6 Ordner zeigen Bilder aus dem „Hobiger / Weninger – Programm" („230894_1GW_Z1",

[129] ÖHV = österreichische Hagelversicherung

„230894_1GW_Z2_Int4“, „230894_Z2_ges“, „230894_1GW_Z3_Int4“, „230894_Z1_ges“, „230894_1GW_Z3_abInt1“) mit Informationen über Seeding, Bodenhagelmeldungen (Karten, HTPs) und Gewitterzugpfade. Da diese Fallstudie ein Beispiel für gelungenes Seeding darstellen könnte, wird nachstehend nur auf jene Gewitterpfade eingegangen, die keinen Bodenhagel lieferten.

Einflussgrundlagen:

A. Wetterlagenbericht:

Diese nachfolgende Übersicht wurde direkt von der ZAMG übernommen:

Auszug aus dem Witterungsverlauf August 1994:

Datum	Wetterlage	
21.-24.	G	Flache Druckverteilung und eine sehr warme, meist westliche Höhenströmung bestimmen das Wetter in Österreich. Bei zunehmender Gewitterhäufigkeit betragen die höchsten Temperaturen 22° bis 31 °C. Am 24. bewirkt eine Gewitterzone Abkühlung um etwa fünf Grad.

Legende: siehe Kapitel 14.2.1.

Höhenwinde: in 5000 ft Höhe: Richtung SW, Stärke 5-16 kt (Knoten[130])
in 10000 ft Höhe: Richtung W, Stärke 10 – 30 kt

B. Radarbilder:

Für die Gewitterereignisse dieses Tages stehen Bilder von den Radars Schwechat und Zirbitzkogel in der Zeit von 13:05 – 18:05 Uhr UTC (15:05 – 20:05 Uhr MESZ) zur Verfügung. Insgesamt wurden 4 Gewitterzugpfade definiert:

Zugpfad 1: 15:05 – 16:05 MESZ
Zugpfad 2: 15:35 – 16:25 MESZ
Zugpfad 3: 16:15 – 16:55 MESZ
Zugpfad 4: 18:05 – 20:05 MESZ

Für die ersten drei Zugpfade wurde kein Bodenhagel registriert, für Zugpfad 4 hingegen schon. Die Gewitterzelle des Zugpfades 4 zeigt allerdings wesentlich intensiveren Radarhagel als die Zellen der ersten drei Zugpfade.

[130] 1 Knoten = 1 Seemeile / Stunde = 1,852 km/h

Da, wie schon in Fallbeispiel 1 gezeigt, dass Wetterradar Schwechat wenig aussagekräftige Daten liefert, werden nachstehend anhand der Bilder des Wetterradars Zirbitzkogel die Gewitterentwicklungen dokumentiert, wobei die Planquadrate erst ab Intensitätsstufe 3 angegeben sind.

Beschreibung der Gewitterentwicklung laut Radarbild (Wetterradar Zirbitzkogel):

Zeit (MESZ)	Planquadrat	Beschreibung
15:05 – 15:55	1, 2, 3, 8, 9, 10, 13, 15, 16, 18, 19, 22, 23, 24, 25	Eine Gewitterfront baut sich im Raum Leoben – Bruck auf und zieht in weiterer Folge auf der Linie Stubalpe – Gleinalpe – Fischbacheralpe relativ rasch nach Südost und erreicht um 15:55 Graz
16:05	23	Zelle schwächt sich über Graz ab, im Wechselgebiet baut sich neue Zelle auf, die dann nach Osten abzieht, in PQ 23 im Bereich Pleschkogel bei Deutschfeistritz Int 8 in 2000 – 3000 m Höhe bei Topshöhen von nur 10 km erreicht.
16:15 – 16:55	23, 30, 31, 32, 33, 38, 39, 40	Die Zelle zieht über Graz hinweg
17:05 – 17:45	40, 41, 42, 47, 48, 49	Zelle wandert Richtung Südost und löst sich südöstlich von Feldbach auf.
17:55 – 18:25		keine Gewitterzellen über dem Planquadratraster
18:35[131]	*15, 22, 23; 31*	*Gewitterzelle bildet sich westlich vor PQ 15 , kleine Zelle über Graz – Maria Trost*
18:45 – 19:05	*15, 16, 22, 23*	*Zugrichtung nach Osten (führte später an den Klimastationen Rechberg und Weiz zu Bodenhagelmeldungen)*
Bild 19:15 fehlt!		
19:25 – 19:35	*22, 23, 24, 29, 30,*	*Neue Zelle baut sich über Pleschkogel auf; über PQ 24 bereits Int 7 erreicht, Topshöhe etwa bei 12 km.*
19:45	*22, 23, 24, 25, 29, 30, 31, 32, 33, 36, 37*	*Gewitterzelle dehnt sich flächenmäßig stark, über PQ 24 und PQ 25 wird Int 7 in der Höhe von 2000 – 6000 m bei Topshöhen von 14 – 15 km erreicht, das heißt Radarhagel ist höchst wahrscheinlich.*
19:55	*- „ - + 26, 34*	*In PQ 25 Int 8 erreicht (bis 5000m), Wolkenturm im oberen Bereich ausgedünnt.*
20:05	*26*	*In PQ 26 Rückgang der Int 7 auf die Fläche von einem Pixel*

Tab.14.10: Chronologische Radarcharakterisierung nach Planquadraten vom 23.8.1994

Die Zugpfade 1 und 3 sollen im Folgenden genauer besprochen werden. Tab.14.11 zeigt die Koordinaten der Gewitterzellkerne, die maximale Radarintensitätsstufe und die Topshöhe. Radarhagel ist ab der Intensitätsstufe 7 und Topshöhen über 10 km wahrscheinlich.

[131] Die kursiv fortgesetzte Charakterisierung der Radarbilder wird in Folge nicht genauer untersucht, da es sich um Zugpfade handelt, die auch zu Bodenhagel führten. Die Untersuchung beschränkt sich auf die zeitlich früheren Zugpfade.

Uhrzeit (MESZ)	Koordinaten Z1 (PQ-Pixel)	Koordinaten Z3 (PQ-Pixel)	max. Intensität [Stufe 1-8]	Topshöhe [km]
15:05	814[132]		6	9
15:15	842		6	8
15:25	939		6	8
15:35	1625		7	10
15:45	1731		7	8
15:55	1739		7	12
16:05[133]	2422	*2336*	6, *8*	6, *11*
16:15		2233	6	9
16:25		2246	7	11
16:35		2338	7	9
16:45		3021	7	8,5
16:55		3029	6	8

Tab. 14.11.: Zeitlicher Vergleich der maximalen Intensitäten und Topshöhen zweier Zugpfade vom 23.8.1994.

C. Seedingreports:

Wie bei der Charakterisierung der Radarbilder oben soll nun ebenfalls in tabellarischer Form die Impftätigkeit der Hagelflugzeuge dokumentiert werden:

Zeit (MESZ)	Planquadratviertel	Kommentar
15:45	Brenner: 23	Beimpfung mit Brenner, weiter nördlich in PQ 16, 17 Int 7 gegeben.
15:55 – 16:05	Brenner: 23, 31/1, 31/2, 32/1	In PQ 22, 23 Int 7 erreicht, Beimpfung rechtzeitig
16:15	Brenner: 23, 24/3, 24/4, 31/1, 31/2, 32/1	Beimpfung ausgedehnt, sie erfolgt an der Gewittervorderseite
16:25	Brenner: 23, 24/3, 24/4, 30/2, 31/1, 31/2, 32/1	„-„
16:35	Brenner: 23, 24/3, 24/4, 30/2, 31/1, 31/2, 32/1	Int 7 bis 5000 m Höhe, Beimpfung flächendeckend
16:45	Brenner: 24/3, 24/4, 30/2, 31/1, 31/2, 32/1 Fackeln: 31/1, 31/2, 32/1	Fackeleinsatz östlich der maximalen Intensität
16:55	Brenner: 23/4, 24/3, 24/4, 30/2, 31/1, 31/2, 32/1 Fackeln: 31/2, 32/1	Intensität bereits deutlich zurückgegangen

[132] Z.B. 814: Die erste Ziffer gibt das Planquadrat an, die zweite das Planquadratviertel, die dritte das 2 mal 2 km große Pixel. Z.B.: 2422: die ersten beiden Ziffern geben das Planquadrat an, dann wie oben.

[133] in PQ 2336 wurde Int 8 in 2000-3000 m Höhe erreicht, dieser Punkt wurde aber nicht als Kern eines Gewitterzugpfades definiert und ist daher kursiv dargestellt.

17:05	Brenner: 23/4, 24/3, 24/4, 30/2, 31/1, 31/2, 32/1 Fackeln: 31/2, 32/1	Intensität bereits unter Stufe 4, kein Radarhagel, AgJ-Impfung noch fortgesetzt
17:15	Brenner: 23/4, 30/2, 31/1, 31/2, 32/1 Fackeln: 31/2, 32/1	„-„
17:25	Brenner: 23/4, 31/2, 32/1 Fackeln: 31/2, 32/1	„-„

Tab. 14.12: Seedingtätigkeit am 23.8.1994

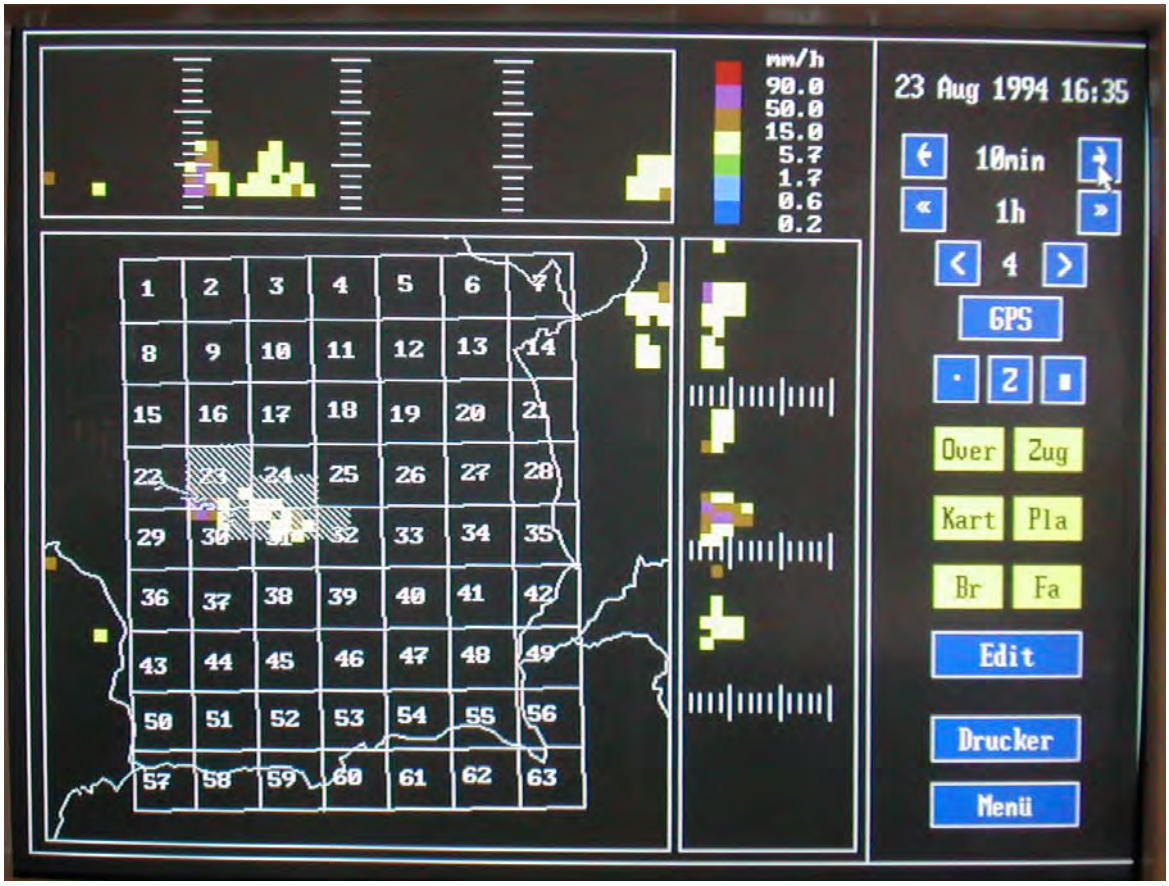


Abb. 14.3.: Radarbild mit Ausweisung der beimpften Flächen um 16:35, maximale Intensität in 3000 – 5000 m Höhe. Darstellung wegen besserer Lesbarkeit erst ab Intensitätsstufe 4.

Insgesamt wurden bei den hier relevanten Einsätzen 80 l AgJ-Lösung verbrannt und 4 Fackeln abgebrannt. Folgende zwei Einsätze sind zur Hagelunterdrückung geflogen worden:

Einsatz 1:
Nr. 89, Einsatzgebiet Reicherhöhe, Gewitterzugrichtung: OSO
Flugzeit: 15:28 – 17:16 Uhr (Dauer: 1:48h),
Generatorbrenndauer: 15:40 – 17:10 (Dauer: 1:30 h)
AgJ-Verbrauch: 40 l Wolkenbasis: 6000 ft (≈ 2000 m) Temp.: +16°C in 6000 ft
2 Fackeln: 16:44: 31/2, 32/1
16:55: 31/2, 32/1
Flugbereiche: 15:40 – 16:10 : 23 Aufwind: 450 ft/s
16:10 – 16:40: 24/3, 24/4 Aufwind: 500 - 700 ft/s
16:40 – 17:10: 31/2, 32/1 Aufwind: 800 ft/s

Einsatz 2:
Nr. 90: Einsatzgebiet Reicherhöhe Gewitterzugrichtung: O
Flugzeit: 15:45 – 17:21 Uhr (Dauer: 1:36 h)
Generatorbrenndauer: 15:50 – 17:20 Uhr (Dauer: 1:30 h)
AgJ-Verbrauch: 40 l Wolkenbasis: 6000 ft Temp.: 18°C in 5000 ft
2 Fackeln: 16:45: 31/1, 31/2
16:45: 31/1, 31/2
Flugbereiche: 15:50 – 16:20: 32/1, 31/1, 31/2 Aufwind: 1000 ft/s
16:20 – 16:50: 30/2 Aufwind: 1500 ft/s
16:50 – 17:20: 23/4 Aufwind: k.A.

Wirkungsgrundlagen für Fall 2 – 23. 08. 1994:

A. Klimastationen:

Die im Gewittereinzugsbereich liegenden Klimastationen liefern folgende Daten (hier für den 23.08.1994), wobei diese und auch jene für die Fälle 1 und 3 von der ZAMG Regionalstelle Graz – Thalerhof zur Verfügung gestellt wurden[134]:

name	istnr	tmin	tmax	t7	t14	t19	t	nied 07	nied07a	nied19	nied19a	nied	nieda
RECHBERG	13400	124	236	134	235	160	180	45	Regen	57	Hagel+ Regen	57	Hagel+ Regen
LOBMING	16300	123	260	153	255	173	192	90	Regen	266	Regen	272	Regen
GRAZ-FLUGHAFEN	16400	133	269	150	258	230	201	86	Regen	0	Regen	65	Regen
GRAZ-MESSENDORFB.	16401	143	270	167	262	214	207	83	Regen	2	Regen	24	Regen
ST.RADEGUND	16411	137	246	171	232	167	192	42	Regen	136	Regen	139	Regen
GRAZ-	16412	140	278	160	260	214	209	72	Regen	17	Regen	30	Regen

[134] Die Daten der Klimastationen dienen der Bestätigung der Niederschlagsart und brachten keine neuen Erkenntnisse. Darum wird in den Diskussionen in Kapitel 15 nicht eigens auf deren Daten eingegangen.

UNIVERSITAET													
GLEISDORF	16500	127	272	144	263	214	200	33	Regen	51	Regen	63	Regen
LASSNITZHOEHE	16511	138	254	158	246	206	196	53	Regen	25	Regen	32	Regen
WEIZ	16520	139	283	157	272	221	211	25	Regen	12	Hagel+ Regen	22	Hagel+ Regen
LEIBNITZ / SILBERBERG	19011	126	282	138	268	242	204	198	Regen	-1	-	124	Regen
BAD GLEICHENBERG	19201	147	272	150	270	233	210	61	Regen	2	Regen	30	Regen

Tab. 14.13.: Klimastationsdaten der Stationen, die im Gewittereinzugsgebiet lagen, zur Verfügung gestellt von der ZAMG- Regionalstelle Graz - Thalerhof

Legende zu Tab. 14.13.: **nied07** = Niederschlag 7 Uhr, **nied07a** = Niederschlagsart 7 Uhr, sonst siehe oben (Kapitel 14.2.1).

Die beiden Hagelmeldungen Rechberg und Weiz beziehen sich auf die zeitlich späteren zu Bodenhagel führenden Gewitterzugpfade und sind für diese Fallstudie nicht relevant.

Wirkungsgrundlagen wie Bodenhagelmeldungen sind in diesem Fall nicht gegeben und können daher auch nicht diskutiert werden. Die Bodenhagelereignisse an diesem Tag sind anderen Zugpfaden zuzuordnen und daher für diese Untersuchung nicht relevant. Die Interpretation obiger Daten erfolgt in Kapitel 15.2.

14.2.3. Fall 3 – 03.08.2002

Dieser Fall beschreibt den Verlauf eines Nachtgewitters über der Südweststeiermark und Graz in der Zeit von 17:50 – 21:45 Uhr UTC (= 19:50 – 23:45 MESZ), wobei Radarbilder sowohl von Schwechat als auch vom Zirbitzkogel zur Verfügung stehen. Diese sind im Anhang bis zum 20:00 – Uhr - Bild als Dateiordner „Sch 20020803“ und „Zk 20020803“ sowie vom 20:05-Uhr-Bild bis zum 21:45 – Uhr – Bild als „sw_20020803“ und „zk_20020803“ zu finden. Dieser Fall ist ein Beispiel für eine Situation, in der Radarhagel gegeben war, Bodenhagel jedoch nicht registriert wurde und auch kein Seeding stattfand[135].

[135] Ab 22:00 MESZ entwickelt sich über dem Süden von Graz eine Zelle neu, die später Graupel liefert. Diese Entwicklung ist für die Diskussion dieses Falles jedoch irrelevant.

Einflussgrundlagen:

A. Wetterlagenbericht:

In der Kurzcharakteristik ist die Wetterlage mit „G“ für gradientschwach zu beurteilen. Nachfolgende Prognosen der Wetterlage für den Ereignistag stammen direkt von der Außenstelle der ZAMG Graz – Thalerhof. Aus Anschaulichkeitsgründen sind nachstehend die Prognosen um 8:00, 11:00 und 14:00 Uhr abgedruckt.

PROGNOSEN GRAZ vom 03.08.2002

```
FPOS55 LOYG 030600
ZAMG, Regionalstelle fuer die Steiermark, Wetterdienst Graz.
WETTERBERICHT FÜR DIE STEIERMARK vom Samstag,
03. August 2002, 0800 Uhr
Wetterlage:
Trockene Luft über der Alpensüdseite reduziert heute die
Niederschlagsneigung über der Steiermark deutlich.
Heute Samstag:
Vielfach scheint die Sonne.
Am Nachmittag entstehen über den
Bergen der Obersteiermark Quellwolken und danach hier örtlich
gewittrige Regenschauer.
In den übrigen Landesteilen bleibt es
meist trocken.
Höchsttemperaturen heute in den tiefen Lagen
stellenweise bis 30, in 2000m Höhe bei 14 Grad.

Morgen Sonntag:
Es folgt wiederum Sonnenschein und es wird sehr warm. Ab Mittag
beginnt es jedoch über den nördlichen Landesteilen schon stärker zu
quellen.
In der Obersteiermark ist ab Mittag mit ersten
Wärmegewittern zu rechnen, ab dem späteren Nachmittag stellenweise
auch im Süden. Frühtemperaturen um 15, Höchstwerte 26 bis 30 Grad.

Übermorgen Montag:
Am Montag Durchzug einer Störung. Allgemein Bewölkungszunahme und
zeitweise gewittriger Regen. Es kühlt auf etwa 22 bis 23 Grad ab.
Weitere Aussichten für die Steiermark:
Am Dienstag wechselhaftes Wetter. Nur kurzzeitig etwas Sonne, danach
ist es wieder zeitweise niederschlagsanfällig.
Graz morgen:
sonnig, später Gewitterneigung, 30 Grad.

==========================================================================
NAECHSTER TERMIN
==========================================================================

FPOS55 LOYG 030900
ZAMG, Regionalstelle fuer die Steiermark, Wetterdienst Graz.
WETTERBERICHT FÜR DIE STEIERMARK vom Samstag,
03. August 2002, 1100 Uhr
Wetterlage:
Zunehmend trockene Luft hat sich heute über die Alpensüdseite gelegt.
Heute Samstag:
Vielfach scheint die Sonne.
Am Nachmittag entstehen über den
Bergen der Obersteiermark Quellwolken und danach hier örtlich
gewittrige Regenschauer.
In den übrigen Landesteilen bleibt es
voraussichtlich trocken.
```

```
Höchsttemperaturen heute in den tiefen
Lagen stellenweise bis 30, in 2000m Höhe bei 14 Grad.

Morgen Sonntag:
Es folgt wiederum Sonnenschein und es wird sehr warm. Ab Mittag
beginnt es jedoch über den nördlichen Landesteilenschon stärker zu
quellen.
In der Obersteiermarkist ab Mittag mit ersten
Wärmegewittern zu rechnen, ab dem späteren Nachmittag stellenweise
auch im Süden. Frühtemperaturen um 15, Höchstwerte 26 bis 30 Grad.

Übermorgen Montag:
Am Montag Durchzug einer Störung. Allgemein Bewölkungszunahme und
zeitweisegewittriger Regen. Es kühlt auf etwa 22 bis 23 Grad ab.
Weitere Aussichten für die Steiermark:
Am Dienstag wechselhaftes Wetter. Nur kurzzeitig etwas Sonne, danach
ist es wieder zeitweise niederschlagsanfällig.

==========================================================================
NAECHSTER TERMIN
==========================================================================

FPOS55 LOYG 031200
ZAMG, Regionalstelle fuer die Steiermark, Wetterdienst Graz.
WETTERBERICHT FÜR DIE STEIERMARK vom Samstag,
03. August 2002, 1400 Uhr
Wetterlage:
Eine Labilisierungszone nähert sich von Westen her den Alpen.
Heute Samstag:
In der Steiermark scheint vielfach die Sonne.
Am Nachmittag
entstehen über den Bergen der Obersteiermark Quellwolken, es bleibt
aber auch hier meist gewitterfrei.
Nachmittagstemperaturen heute
in den tiefen Lagen stellenweise bis 29, in 2000m Höhe bei 14 Grad.

Morgen Sonntag:
Es ist von der Früh weg sonnig. Ab Mittag beginnt es über den
nördlichen Landesteilen stärker zu quellen.
In der Obersteiermark
ist ab Mittag mit ersten Wärmegewittern zu rechnen, ab dem späteren
Nachmittag stellenweise auch im Süden. Frühtemperaturen um 15,
Höchstwerte 26 bis 30 Grad.

Übermorgen Montag:
Am Montag Durchzug einer Störung. Allgemein Bewölkungszunahme und
zeitweise gewittriger Regen. Es kühlt auf etwa 22 bis 23 Grad ab.
Weitere Aussichten für die Steiermark:
Am Dienstag wechselhaftes Wetter. Nur kurzzeitig etwas Sonne, danach
ist es wieder zeitweise niederschlagsanfällig.
```

Wie man den folgenden Radarbildbeschreibungen entnehmen kann, war die obige Prognose wenig zutreffend, über Graz bildete sich in der Nacht eine konvektive Zelle.

Nachfolgend die Wetterprognose für die „hail air“, zur Verfügung gestellt von J. Daum:

Zeitpunkt der Prognose: 05:40 UTC Abzug einer Kaltfront nach E, bei leichter Labilisierung im Tagesgang von SW. T max 27°C Gegen Abend im Bergland östlich der Linie Koralpe Wechsel CB Wolken Prob 40. Zugrichtung der Zellen 80 -90° E.

B. Radarbilder:

Die Radarbilder liegen sowohl von Schwechat als auch vom Zirbitzkogel von 17:50 – 21:45 Uhr UTC (= 19:50 – 23:45 Uhr MESZ) vor. Im Vergleich zu den diskutierten Fällen 1 aus dem Jahr 1991 und 2 aus dem Jahr 1994 stand im Jahr 2002 bereits ein höher auflösendes Radarbild mit Pixelgrößen von 1 mal 1 km gegenüber vormals 2 mal 2 km zur Verfügung. Die Intensitätsskala wurde von 8 Stufen auf 14 Stufen erweitert, wobei die „hagel-verdächtigen“ Intensitäten bei Stufe 12 (ab Regenrate 50 mm/h) beginnen. Die Zeitintervalle zwischen zwei Bildern konnten auf 5 Minuten halbiert werden. Wie schon in vorigen Kapiteln erwähnt, konnte diese Zeitintervallverkürzung von der Einsatzleitung der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft nicht genutzt werden, da die Datenleitung zu niedrig dimensioniert war.

Folgende Aufstellung (Tab. 14.14) beschreibt den Gewitterhergang im 5 – Minuten – Intervall und gibt die Positionen der höchsten Intensitäten nach Planquadratvierteln an. Als Basis wurden die Bilder der TU-Graz vom Wetterradar Zirbitzkogel gewählt. Zur Verdeutlichung der unterschiedlichen Radarechos von Schwechat und Zirbitzkogel sind in Abb. 14.4 zwei Radarbilder dargestellt, die zur selben Uhrzeit aufgenommen wurden. Die Unterschiede liegen sowohl in der räumlich – flächigen Ausdehnung als auch in der Intensitätsausweisung. Die vollständigen Bilderreihen beider Wetterradars finden sich als 4 Dateiordner im Anhang (siehe auch oben).

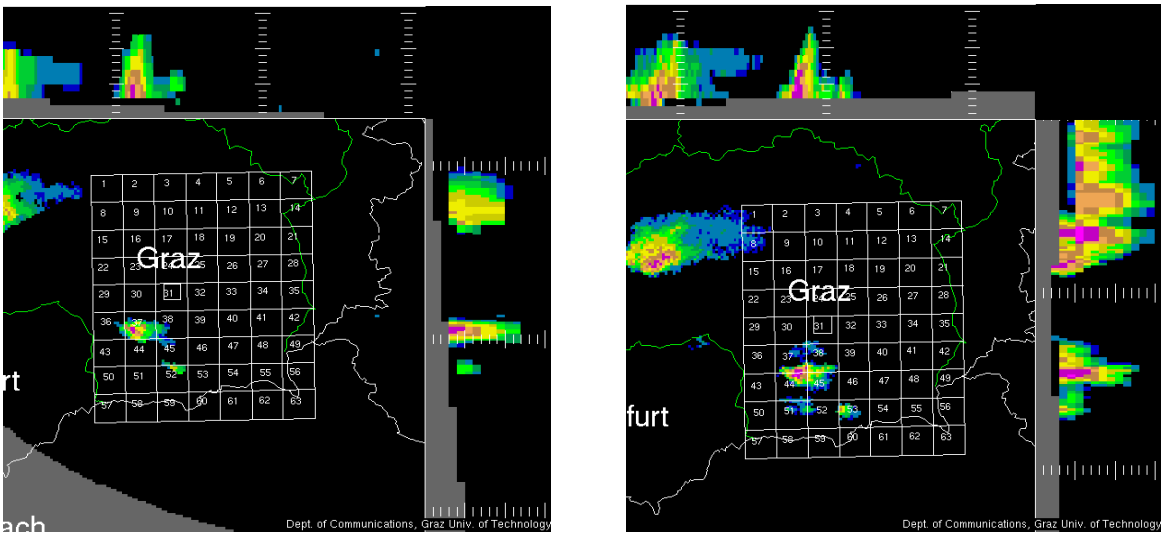


Abb. 14.4: Vergleich der Radarbilder von Schwechat und vom Zirbitzkogel zum selben Zeitpunkt (19:35 UTC, 3.8.2002).

Uhrzeit (MESZ)	Schwechat (max. Int. nach PQ)	Zirbitzkogel (max. Int. nach PQ)
19.50 – 20: 05	kein Radarecho	kein Radarecho
20:10	kein Radarecho	erstes Radarecho (Stufe 1-2) in PQV 38/2, 39/1
20:15	Int 6[136] in 31/3	Int 6 in 39/1
20:20	Int 6 in 31/3, 31/4	Int 6 in 39/1
20:25	Int 3 in 31/3	Int 5 in 39/1, 39/2
20:30	kein Echo im Raum Graz; größere Zellen in 22, 50, 51	kein Echo im Raum Graz; größere Zellen in 29, 58, 59
20:35	- „ -; plus Zelle in 43	„ – „„ in 58 Int 9 (8,6 – 15 mm/h) erreicht, plus Zelle am Schnittpunkt 43, 44, 50, 51.
20:40	alle 3 Zellen stationär, leicht ausgedehnt, Int 9 jeweils erreicht	alle 3 Zellen stationär, Int 9 nur in südlichster Zelle
20:45	neue 4. Zelle in 36, 37, bilden Nord-Süd-Linie; max Int. 10 in PQ 50	neue 4. Zelle in 37, bilden Nord-Süd-Linie; Int 10 in Zelle 1 (PQ 29), Zelle 3 (PQ 43, 44, 51), Zelle 4 (PQ 58, 59), Int 11 (27 – 50 mm/h) in 51, 58 erreicht
20:50 –20.55	Entwicklung bleibt räumlich gegenüber Zirbitzkogel verschoben und an Intensitäten zurück	Int 11 und 12 (50 – 89 mm/ h) in 43, 44; Topshöhen 11 km, Höhe max. Intensität 3000 – 6000 m.
21:00	Int 11 in PQ 43	Int 13 (89 – 153,8 mm / h) in 44/3 (über Deutschlandsberg)! Über Mooskirchen (PQ 37) Int 12.
21:05	südlichste Zelle fast aufgelöst (PQ 51, 52)	südlichste Zelle noch bis Stufe 5 vorhanden
21:10	südlichste Zelle aufgelöst	Reste von südlichster Zelle vorhanden (in 59, 60)
21:15 – 21:35	Zellen vereinigen sich, im Süden noch 1 Restzelle vorhanden, Kern in 37/3, Int 11, Topshöhe 12 km, Zelle erstreckt sich über PQ 37 und 38	Zellen vereinigen sich, im Süden noch 2 Restzellen vorhanden, Kern in 37/4, 44/2; Int 11-12; Topshöhe in 13 km
21:40 – 21.45	Zelle breitet sich nach ONO aus und entwickelt in 37/2, 38/1 neuen Kern (über Lieboch) mit Int 11	Zelle breitet sich nach ONO aus
21:50	Int 12 in 37/2	Int 13 in 38/1 und 38/3 (über Dobl)
21:55	max. Int.10 in 37, 38	Int 13 in 38/1
22:00	Zelle mit Kern in 37/2, 38/1, Int 11	Zelle mit Kern in 38/1, 38/2, Int 12

Tab. 14.14.: Radarbildcharakterisierung der Bilder von Schwechat und vom Zirbitzkogel vom 3.8.2002.

[136] Regenrate 1,7 – 2,7 mm/h

Die weitere Gewitterbeschreibung beschränkt sich auf die Entwicklung der Zelle im Raum Graz, für deren Charakterisierung nur das Wetterradar Zirbitzkogel herangezogen wird:

Uhrzeit (MESZ)	Zirbitzkogel (max. Intensität nach PQ)
22:05 – 22:15	Zelle bewegt sich Richtung NO, flächige Ausdehnung nach Ost, Zellkern erweitert, Zentrum nach wie vor in PQ 38/2, Int. 12, Topshöhe 13 km
22:20 – 22:30	Kern entwickelt in PQ 31/4 Int. 13, bildet dann in PQ 32/3 auf einer Grundfläche von 6 mal 2 km Int.13 in 4000 – 7000 m Höhe aus, Topshöhe 15 km
22:35	Kern über PQ 32/3, Int 13 von 3000 – 8000 m (!)
22:40 – 23:00	Gewitter zieht im Südosten von Graz vorbei, weiter über Laßnitzhöhe, um 23:00 schwächste Kernausbildung (nur auf einem Pixel = 1 mal 1 km Int. 12) in PQ 32/2
23:05-23:15	Zellkern befindet sich an linker (westlicher) Flanke des weit nach Osten nach Ungarn reichenden Systems in PQ 32/2 kurz vor Gleisdorf
23:20 – 23:45	Auflösung der Gewitterfront

Tab. 14.15: Charakterisierung der Radarbilder vom Zirbitzkogel vom 3.8.2002, ab 22:05

C. Seedingreports:

Da die betroffenen Gebiete nicht von der Hagelabwehrgenossenschaft beflogen werden, liegen keine Seedingreports vor. Es konnte jedoch nach Rücksprache mit der dort (im Raum Deutschlandsberg) tätigen „hail air“ und der im Süden von Graz tätigen Südflug erhoben werden, dass von der „hail air“ kein Einsatz im oben genannten Gebiet zur fraglichen Zeit geflogen wurde. Die Südflug, die als einziger Hagelabwehrbetreiber in der Steiermark auch Nachtflüge durchführt, führte nach Auskunft von J. Daum von 22:00 Uhr bis 23:01 MESZ einen Einsatzflug in den Planquadraten 38 und 39 durch.

Wirkungsgrundlagen für Fall 3 – 03. 08. 2002:

A. Klimastationen:

Die im Gewittereinzugsbereich liegenden Klimastationen liefern folgende Daten (hier für den 23.08.1994), wobei diese und auch jene für die Fälle 1 und 2 von der ZAMG Regionalstelle Graz – Thalerhof zur Verfügung gestellt wurden[137]:

name	istnr	tmin	tmax	t7	t14	t19	t	nied07	nied07a	nied19	nied19a	nied	nieda
LOBMING	16300	153	290	191	279	233	222	-1	-	-1	-	0	Regen
GRAZ-FLUGHAFEN	16400	176	301	202	283	266	239	-1	-	-1	-	208	Regen
ST.RADEGUND	16411	151	261	193	243	212	206	-1	-	-1	-	4	Regen
GRAZ-UNIVERSITAET	16412	171	288	195	287	257	230	-1	-	-1	-	0	Regen
GLEISDORF	16500	164	284	185	276	246	224	-1	-	-1	-	16	Regen
LASSNITZHOEHE	16511	171	272	205	266	228	222	3	Regen	-1	-	95	Regen
DEUTSCHLANDS-BERG	18906	156	290	201	280	257	223	-1	-	-1	-	71	Regen
WIEL	20600	150	242	189	234	212	196	-1	-	-1	-	1	Regen
BAD RADKERSBURG	20902	165	288	187	276	252	227	-1	-	-1	-	-1	-

Tab. 14.16.: Klimastationsdaten der Stationen, die im Gewittereinzugsgebiet lagen, zur Verfügung gestellt von der ZAMG- Regionalstelle Graz - Thalerhof

Die Legende ist der Tabelle 14.4 in Kapitel 14.2.1. zu entnehmen.

B. Bodenhagel:

Die für dieses Fallbeispiel gewählte Zelle (über Deutschlandsberg) blieb trotz Radarhagel ohne Bodenhagel, wobei auch nicht beimpft wurde. Leichter Bodenhagel (eigentlich Graupel, Körnung 0,2 – 0,4 mm) wurde laut Angaben von J. Daum um 22:35 Uhr MESZ im Raum Fernitz bei Graz gemeldet. Dabei handelte es sich schon um eine weitere Zelle, die durch Verschmelzung mit der von Deutschlandsberg kommenden Zelle entstanden ist und neue Dynamik entwickelte.

Die Diskussion dieses Gewitterereignisses folgt in Kapitel 15.3.

[137] Die Daten der Klimastationen dienen der Bestätigung der Niederschlagsart und brachten keine neuen Erkenntnisse. Darum wird in den Diskussionen in Kapitel 15 nicht eigens auf deren Daten eingegangen.

15. Diskussion der Ergebnisse

15.1. Fall 1 – 26.06.1991

Die Interpretation der Radarbilder wäre nicht allzu schwierig, würden nicht die Bilder vom Wetterradar Zirbitzkogel und Schwechat sehr unterschiedliche Informationen liefern. Sowohl die Intensitäten liegen, wie in Kapitel 14.1. schon erwähnt, beim Zirbitzkogel etwa 2 Stufen über denen von Schwechat, als auch die Topshöhenangaben und Angaben zu Höhen der maximalen Intensität differieren deutlich. Die Intensitätsdarstellungen in den Seitenrissen (Nord-Süd-Schnitt und West-Ost-Schnitt) sind mit großer Vorsicht zu beurteilen, da es sich bei diesen Darstellungen auch um vor der zu untersuchenden Gewitterzelle liegende Zellen handeln könnte, die am Grundriss nicht mehr im sichtbaren Bildausschnitt liegen (vgl. Abb. 14.4). Berücksichtigt man die durch die Technik der genannten Wetterradars im Jahr 1991 gegebenen Unzulänglichkeiten, wie in Kapitel 12.1.3 geschildert (z.B. Abschattungseffekte, fehlende doppelte Polarisation etc.), ist die Deutung der Bilder betreffend Hagelwahrscheinlichkeit nicht mit Sicherheit durchzuführen. Für diesen Fall und die weiteren 2 Fälle wurde angenommen, dass bei einer Intensität von Stufe 7 und 8 bzw. 12-14 für den Fall aus dem Jahr 2002 (ab Regenrate 50 mm/h) Radarhagel gegeben ist. Als problematisch anzusehen ist auch, gerade hinsichtlich der raschen dynamischen Veränderung einer Gewitterzelle, die Verfügbarkeit der Radarbilder im allzu großen Zeitintervall von 10 Minuten.

Zur Interpretation der Beimpfung ist zu sagen, dass von 13:35 bis 15:55 Uhr die Beimpfung der sich über der Gleinalm entwickelnden Zelle an deren Vorderseite erfolgt und daher als zeitlich und auch flächenmäßig als gelungen betrachtet werden kann. Von 16:05 bis 16: 25 bewegt sich die Gewitterzelle schneller nach Südosten, als es die Flugzeuge tun. Die Beimpfung erfolgt hier nicht mehr vor der Front, sondern zentral (da stellt sich das Problem, wie das technisch gemacht wurde) und bereits hinter der Gewitterfront. Bis 17:25 deckt die Beimpfungsfläche den gesamten Zellenkomplex, der sich zur Superzelle entwickelt hat, ab. Im Einsatzgebiet der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft wird weiterhin flächendeckend beimpft. Das Gewitterzentrum bewegt sich allerdings am südlichen Rand des Einsatzgebietes vorbei. Die Beimpfungen enden um etwa 17:40 , zu dieser Zeit ist der Gewitterherd bereits über PQ 48 (südlich von Feldbach) außerhalb des Einsatzgebietes. In diesem Gebiet sollte die Firma „Südflug“ Hagelabwehraktivitäten setzten, diesbezügliche Informationen standen jedoch nicht zur Verfügung. Die zweite Zelle, die sich mit Beginn um etwa 16:05 Uhr über

PQ 19, 20 (Raum Stubenberg) zu entwickeln begann, wird ab 16:15 beimpft. Die Beimpfung erfolgt ab diesem Zeitpunkt durchgehend und flächendeckend. Einige Minuten später vereinigen sich die beiden Zellen zu einer in Kapitel 14.1. diskutierten gemeinsamen Gewitterfront, die Beimpfung bleibt flächendeckend. Betrachtet man den gesamten operativen Einsatz der Genossenschaftsflugzeuge, kann hinsichtlich des Einsatzzeitpunktes und der flächenmäßigen Ausbringung von einem nahezu gelungenen Einsatztag gesprochen werden. Problematisch sind jedoch die allzu ungenauen Pilotenangaben nach Planquadratviertel (entspricht einer Fläche von 6 mal 6 Kilometer) und im viel zu großen Zeitintervall von einer halben Stunde. Die angeführten Angaben zur Höhe der Wolkenbasis und zur Aufwindgeschwindigkeit tragen zur korrekten Interpretation wenig bei, da die Wolkendynamik sowie der genaue Ort der Ausbringung und damit der Weg des Silberjodids in der Wolke infolge obiger Angaben unbekannt bleibt und bestenfalls abgeschätzt werden kann.

Die ersten Hagelschläge am Boden wurden um 16:00 in St. Bartholomä (PQ 30) gemeldet. Laut Radarbild erreicht die Gewitterzelle diesen Punkt erst 10 Minuten später. Um 16:05 wurde in Hengsberg (PQ 45) Hagel gemeldet, die Zelle erreicht dieses Gebiet jedoch erst um 16:45. Um 16:35 wird wieder - offenbar falsch - Hagel in PQ 39 gemeldet (die Zelle hat das Gebiet noch nicht erreicht). Die weiteren Hagelmeldungen (Karten und HTPs) liegen innerhalb eines Hagelradius‘ von 12 km, dies erscheint realistisch. Um 17:35 und auch in der darauffolgende Stunde liegen wieder einige Meldungen außerhalb des 12-km-Hagelradius‘, dies ist aber wie schon bei den Beispielen oben auf die ungenaue Zeitangabe der Beobachter zurückzuführen.

Besonders interessant ist die Bodenhagelmeldung der Station A09 in PQ 1947 (Puch bei Weiz – Ost) von 17:00 – 1710 Uhr. In diesem Gebiet wurde bereits 15 Minuten vor dem Erreichen der maximalen Intensitäten ab 16:25 beimpft (mit Brennern und Fackeln), der Hagel setzte dennoch von 17:00 – 17:10 mit einer Auftreffenergie von 65 J/m² ein. Vergleicht man die Radarintensitäten dieser Zelle mit jenen der Hauptzelle in den PQs 23 und 30 und vergleicht dann die Auftreffenergien der jeweiligen Hagelschläge am Boden, zeigt sich, dass die laut Radarbild weniger hagelträchtige kleine Zelle im Nordosten trotz Beimpfung Auftreffenergien am Boden hervorgerufen hat, die nicht geringer sind als die des Hagels von der Hauptzelle (im Schnitt unter 60 J/m², Station V06 in PQ 3012, Eisbach – Süd liefert 69 J/m²). Bei Station A09 liegt die Hagelkornanzahl mit Durchmesser 5mm bedeutend höher (850 Stück) als etwa bei den Stationen der Hauptzelle (V06 liefert 62 Körner mit Durchmesser 5mm). Da beide Zellen beimpft wurden, darf vermutet werden, dass bei der

kleineren Zelle (Station A09) die Beimpfung tatsächlich zur Vergrößerung der Hagelkornanzahl gegenüber den Stationen, die von der größeren Zelle mit Hagel getroffen wurde, geführt hat: A09: 2314 Körner, V06: 295 Körner, mit den Nachbarstationen V05 und V07 gesamt 1513. Ebenso könnte die Beimpfung bei der kleineren Zelle zur Verkleinerung der Korndurchmesser geführt haben, wohingegen bei der größeren Zelle der Beimpfungseffekt nicht so spürbar wurde. Bei Station A09 haben die Hagelkörner maximal 10 mm Durchmesser, bei Station V06 gibt es auch solche mit 25 mm Durchmesser. Allerdings kann nicht beurteilt werden, wie die Bodenhagelspektren ohne jeweilige Beimpfung ausgesehen hätten. Generell liegen die Energiewerte, wie Tab. 14.5 zeigt, im Gebiet STK zwischen 12 und 65 J/m², im Gebiet RAD bei maximal 59 J/m² mit der Ausnahme der Station R04 in PQ 4831, die mit 229 J/m² einen besonders hohen Energiewert aufweist.

Folgende Aufstellung stellt die Position von Radarmaxima, Seedingaktivität, Bodenhagel durch Kartenmeldung und HTP-Meldung bei der jeweiligen Uhrzeit gegenüber. Die Auflösung wurde aus Übersichtlichkeitsgründen nach ganzen Planquadraten (12 mal 12 Kilometer) gewählt. Die Details sind in Kapitel 14.2.1 ersichtlich.

Uhrzeit (MESZ)	Radarmaximum	Seeding	Hagelkarte	HTP
12:30 – 13:00	Int 7: 22	-	-	-
13:00 – 13:30	Int 7: 22	10,11	-	-
13:30 – 14:00	Int 7: 22, 15	10, 11, 16, 22, 23	-	-
14:00 – 14:30	Int 8: 15	16, 22, 23	-	-
14:30 – 15:00	Int 6-7:22	16, 22, 23	-	-
15:00 – 15:30	Int 5-6: 23	22, 23, 29, 30	-	-
15:30 – 16:00	Int 8: 22 (neue Zelle)	22, 23, 29, 30	-	-
16:00 – 16:30	Int 8: 22, 29	22, 23, 29, 30; *19, 20*[138]	23, 45	23, 30
16:30 – 17:00	Int 7-8: 30, 31, 37, 38, 45	15, 16, 22, 23, 24, 25, 29, 30, 31, 32, 33, 37, 38, 39, 40; *19, 20, 26, 27*	23, 30	23, 30, 39, 45, 46
17:00 – 17:30	Int 8: 38, 39, 45, 46	15, 16, 18, 19[139], 24, 25, 26, 27, 30, 31, 32, 33, 38, 39, 40	19	29, 38, 39, 45, 46, 47,
17:30 – 18:00	Int 8: 47	18, 19, 25, 26, 27, 31, 32, 33, 38, 39, 40	47, 48, 55	39, 46, 47, 48
18:00 – 18:30	Int 8: 48, 49	25, 26	47, 48, 54, 55	47, 48

Tab. 15.1.: Chronologischer Vergleich von Radarintensitätsmaxima, Seeding und Bodenhagelmeldungen vom 26.6.1991

[138] Zelle 2 aus Nordost

[139] die Kursivschreibweise entfällt, da sich die Zellen vereinigt haben

Die Interpretation obiger Vergleichstabelle zeigt, dass die Seedingtätigkeit bereits 3,5 Stunden bevor der erste Hagelschlag registriert wurde, begann. Die Zelle, die anfangs beimpft wurde, konnte sich allerdings nicht zu einer hagelträchtigen Zelle entwickeln. Die Beimpfung könnte dafür verantwortlich sein, zweifelsfrei behaupten kann man dies jedoch nicht. Generell geht die Befliegung über den gesamten Gewitterverlauf mit den Gewitterzellenzugbahnen einher, die Befliegung und Beimpfung findet meist vor der Gewitterfront statt und ist als insgesamt zufrieden stellend zu beurteilen. Die ersten Bodenhagelmeldungen erfolgen erst um 16 Uhr, sie sind weitgehend im Bereich des Superzellenkerns in alle Richtungen verteilt, also sowohl vor der Zelle als auch bisweilen dahinter. Einige statistische Ausreißer bei den Hagelmeldungen weisen auf die Ungenauigkeit der Angaben der Hagelmelder hin. Der zu hervorhebende Fall, der oben betreffend die HTP-Stationen A09 und V06 diskutiert wurde, könnte ein Beispiel für gelungenes Seeding sein. Überhaupt fällt auf, dass die Auftreffenergien bei den Testplatten in Relation zur den hohen Topshöhen und Intensitäten relativ gering ausgefallen sind. Auch das könnte ein Hinweis auf wirkungsvolle Beimpfung durch AgJ sein. Die Hauptzelle zog über weite Strecken außerhalb des Südrandes des Einsatzgebietes der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft vorbei, die Hagelmeldungen wurden auch außerhalb dieses Gebietes registriert. Die Auswertungen lassen vermuten, dass auch die in diesen Gebieten für den operationellen Hagelabwehreinsatz zuständige Firma Südflug ihrer Aufgabe nachgekommen ist. Generell ist durch die Tatsache, dass die AgJ-Ausbreitung in der Gewitterwolke infolge in vorigen Kapiteln geschilderter Gründe weder exakt vorhersehbar noch nachvollziehbar ist. Die teilweise zeitliche und auch räumliche Ungenauigkeit sowohl bei Einflussgrundlagen (z.B. Seedingreport) als auch Wirkungsgrundlagen (z.B. Benennungs-diskrepanzen bei den HTP-Stationen, siehe Kapitel 14.2.1) und die großen Zeitintervalle von 10 Minuten zwischen einzelnen Radarbildern sowie die durch die Radartechnik gegebene Unmöglichkeit aufgrund dieser Bilder mit Sicherheit auf Radarhagel schließen zu können, machen es unmöglich, eine definitive exakte Aussage bezüglich Wirksamkeit der Wolken-beimpfung durch AgJ hinsichtlich Schadhagelreduktion geben zu können.

15.2. Fall 2 – 23.08.1994

Wie schon in Kapitel 14.2.2 geschildert, handelt es sich laut Radarbildern bei diesem Gewittertag um eine Vielzahl von sich entwickelnden und wieder auflösenden Gewitterzellen, wobei die Fluktuationen und Intensitätsänderungen sowohl örtlich als auch zeitlich sehr ausgeprägt sind. Man kann dieses Gewitterszenario einem Mehrzellengewitter zuordnen. Da dieses Fallbeispiel verdeutlichen soll, dass möglicherweise durch richtiges Seeding Bodenhagel verhindert wurde, wurde in Kapitel 14.2.2 auf die Darstellung und wird hier auf die Diskussion jener Gewitterzugpfade, die auch Bodenhagel nach sich zogen, verzichtet. Der betrachtete Zeitraum liegt zwischen 15:05 und 16:55 Uhr MESZ, die maximalen Intensitäten erreichen die Stufe 7 (Regenrate bis 90 mm/h), nur einmal um 16:05 auf einem Radarpixel die Stufe 8, die Mächtigkeit dieser Zonen hoher Intensität liegt bei maximal 3000 m. Die Topshöhen überschreiten die 11 km – Marke nicht. Das bedeutet, dass diese Gewitterzellen im Vergleich zu jenen in Fall 1 deutlich weniger Intensität und Höhe aufweisen.

Die Seedings beginnen um 15:40 und enden um 17:20 Uhr. Bereits um 15:05 erreicht eine Gewitterzelle in PQ 8, 9 (außerhalb des Einsatzgebietes) Intensitätsstufe 6, die Einsätze erfolgen aber dennoch rechtzeitig und decken flächenmäßig die gesamte Gewitterzone sowie den Bereich vor der sich nach WSW bewegenden Front ab, der Fackeleinsatz fand in der Zeit von 16:44 – 16:55 Uhr statt und erfolgte ebenfalls vor der sich bewegenden Gewitterzelle. Der Einsatz ist daher sowohl zeitlich als auch räumlich als zufrieden stellend zu betrachten. Die Aufwindangaben der Piloten liegen bei 400 – 1500 ft/s, wobei aufgrund zu wenig bekannter Strömungsverhältnisse in der Wolke und auch zu ungenauer Positionsangabe des Piloten (nur auf Planquadratviertel genau) sowie der allzu großen Zeitintervalle bei Bekanntgabe der Positionsänderungen des Flugzeuges (alle 30 Minuten) keine Aussage über die tatsächliche Verteilung des AgJ in der Wolke gemacht werden kann. Die Tatsache, dass in diesem Fall kein Bodenhagel auftrat, ist möglicherweise auf die zufrieden stellende Beimpfung zurückzuführen. Es kann jedoch auch aufgrund der Interpretation der Radarbilder nicht hundertprozentig ausgeschlossen werden, dass das Fehlen von Bodenhagel nicht auch ohne Seeding gegeben gewesen wäre.

Nachstehende Tabelle zeigt zusammenfassend die zeitliche Gegenüberstellung von Radarintensitätsmaxima und Seeding nach ganzen Planquadraten:

Uhrzeit	Radarmaximum	Seeding
15:05	Int. 6: 8, 9	
15:15	Int. 6: 8, 9	
15:25	Int. 6: 9, 10, 16	
15:35	Int. 7: 16, 17	
15:45	Int. 7: 16, 17	23
15:55	Int. 7: 17, 22	23, 31, 32
16:05	Int. 7 + 8: 23	23, 31, 32
16:15	Int. 7: 23	23, 24, 31, 32
16:25	Int. 7: 22	23, 24, 30, 31, 32
16:35	Int. 7: 23, 30	23, 24, 30, 31, 32
16:45	Int. 7: 23, 30	24, 30, 31, 32
16:55	Int. 6: 30, 31	23, 24, 30, 31, 32
17:05	Int. < 5	23, 24, 30, 31, 32
17:15	Int. < 5	23, 30, 31, 32
17:25	Int. < 5	23, 31, 32

Tab. 15.2.: Zeitliche Gegenüberstellung von Radarintensitäten und Seeding vom 23.8.1994

15.3. Fall 3 – 03.08.2002

Dieser letzte Fall unterscheidet sich von den vorangegangenen dadurch, dass es keine Bodenhagelmeldungen und auch keine Seedingeinsätze bis 22:00 Uhr MESZ gab. Der Gewitterverlauf lässt zunächst eine Entwicklung mehrer Zellen entlang einer Nord-Süd-verlaufenden Linie von Gleinalpe, Stubalpe und Koralpe erkennen, um 20:45 sind bereits vier konvektive Zellen ausgebildet. Dieses Mehrzellengewitter bildet bis ca. 21:00 Uhr eine stationäre Linie, ab diesem Zeitpunkt beginnt sich die südliche Zelle aufzulösen, die anderen Zellen beginnen sich zu vereinigen. Um 21:00 Uhr ist kleinräumig über Deutschlandsberg (PQV 44/3) Intensitätsstufe 13 erreicht, um 21:50 Uhr ist Intensitätsstufe 13 über Dobl erreicht (PQV 38/1, 38/3). Anschließend zieht das Gewitter Richtung NNO weiter und erreicht den Süden von Graz. Ab 22:00 Uhr intensiviert sich die Zelle im Süden von Graz, liefert hier im Raum Fernitz leichten Bodenhagel[140] und erreicht sogar größerflächig Intensitätsstufe 13 über Kalsdorf, Hausmannstätten und Vasoldsberg. Die Zelle dehnt sich nach Osten aus, zieht über Laßnitzhöhe hinweg und löst sich kurz vor Gleisdorf auf. Zwischen 22:00 und 23:00 wurde von der Südflug von Graz – Thalerhof aus ein Einsatz mit AgJ-Beimpfung in den PQs 38 und 39 geflogen, der offenbar recht erfolgreich hinsichtlich Schadhagelunterdrückung war.

Eine wesentliche Erkenntnis ist die Tatsache, dass die Radarechos zweier verschiedener Stationen (hier Schwechat und Zirbitzkogel) völlig unterschiedliche Informationen liefern. Das Wetterradar Schwechat zeigt im Schnitt Intensitäten, die 2 Stufen unter jenen des Zirbitzkogels liegen, die räumlich-flächigen Darstellungen (Grundriss und Seitenrisse) der beiden Großraumwetterradars sind ebenfalls um bis zu ein Planquadrat, d.h. um bis zu 12 km, verschoben. Auch bei den Topshöhen gibt es Unterschiede von bis zu 2000 m. Für das relevante Gebiet ist das Wetterradar Zirbitzkogel wegen geringerer Abschattungseffekte und geringerer Entfernung wohl besser geeignet.

Überraschend war, dass trotz eindeutigem Radarhagel kein Bodenhagel (vor 22:30 Uhr) registriert wurde, obwohl (oder weil?) auch nicht beimpft wurde. Diese Tatsache untermauert die Unzulänglichkeit bzw. Ungenauigkeit der vorhandenen Technik und der zur Verfügung stehenden Datenquellen. Berücksichtigt man Fälle, die ohne Radarhagel und ohne Beimpfung zu Bodenhagel führten, wie zum Beispiel am 10.06.1991 passiert, wird die Unsicherheit bezüglich Zuverlässigkeit des Wetterradars noch größer. Bei letzt genanntem Fall stand allerdings nur das Radar Schwechat zur Verfügung.

Dieser hier diskutierte dritte Fall vom 03.08.2002 unterscheidet sich allerdings auch in meteorologischer Hinsicht von Taggewittern, wobei die geänderten Verhältnisse (fehlende Sonneneinstrahlung, vermutlich geringere Dynamik) auf den Hagelbildungsprozess möglicherweise völlig anders einwirken, als dies bei Taggewittern der Fall wäre. Aufgrund fehlender Aufwindangaben und der Unkenntnis der herrschenden dynamischen Verhältnisse und Temperaturen kann letzteres nur vermutet werden.

Eine Zusammenschau mit Schlussfolgerungen und Ausblick wird in Kapitel 16 gegeben.

[140] Dieses Stadium wird in die Fallbetrachtung nicht mehr einbezogen, relevant waren die zeitlich früheren Entwicklungen.

16. Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Ergebnisse der Diskussion der drei Fallstudien (Kapitel 14 und 15) zeigen deutlich, dass weder eine Verifizierung noch eine Falsifizierung der Wirksamkeit der Wolkenbeimpfung mit Silberjodid durch die Flugzeuge der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft wissenschaftlich seriös möglich ist. Zu begründen ist dies wie folgt:

Die Auswertung der Radarbilder hat nicht nur hinsichtlich der bereits in Kapitel 12.1.3 geschilderten Unzulänglichkeiten der Wetterradars Zirbitzkogel und Schwechat, sondern auch hinsichtlich der Ergebnisse der durchgeführten Fallstudien gezeigt, dass es nicht möglich ist, aus dem Radarbild zuverlässig Hagel von Regen zu unterscheiden. Die vorliegende Untersuchung zeigt, dass es Radarhagelfälle ohne Bodenhagel und ohne Beimpfung gibt, dass es Radarhagelfälle mit Bodenhagel und Beimpfung gibt und dass es Radarhagelfälle ohne Bodenhagel mit Beimpfung gibt. Die in dieser Untersuchung nicht diskutierten Fälle von fehlendem Radarhagel bei eintretendem Bodenhagel – am 10.06.1991 zeigte das Wetterradar Schwechat keinen Radarhagel an, es gab aber Bodenhagel - vervollständigen das Bild. Da nach den Gesetzen der Physik jede Messung nur so gut bzw. genau sein kann, wie es der ungenaueste Messparameter vorgibt, sind sowohl bei den Einflussgrundlagen als auch bei den Wirkungsgrundlagen die zur Verfügung stehenden Daten für eine wissenschaftlich zuverlässige Aussage zu ungenau. So ist etwa die Positionsangabe der Flugzeuge nur im Halbstundentakt auf Planquadratviertel genau (das ist eine Fläche von 6 mal 6 km) möglich. Bei der Kleinräumigkeit und großen Dynamik von Hagelereignissen sind diese Angaben nahezu unbrauchbar. Wie in den Kapiteln 3, 4, und 5 geschildert, gibt es nach wie vor keine wissenschaftlich abgesicherte Theorie zur Hagelbildung. Die Existenz der so genannten Akkumulationszone, in der sich unterkühlte Tropfen in der Gewitterwolke befinden sollen wird von manchen Autoren wie beispielsweise H. Höller und P. F. Meischner (1993) bestritten, von anderen wie Galperin et. al. (1996) bestätigt. Man sieht also, dass die vielfältigen Kopplungen von mikrophysikalischen und dynamischen Prozessen die Abschätzung der Impfmaßnahmen sehr schwierig machen. Obwohl die meisten Wolkenphysiker die Wirksamkeit des AgJ zur Gefrierkernvermehrung in der Wolke bestätigen, gibt es nach wie vor Stimmen (z.B. Höller/Meischner, 1993, Browning 1977, zitiert bei K. v. d. Emde 1994), die von einer Niederschlagsreduktion in manchen Situationen sprechen. Als Resultat dieser Untersuchung kann nicht ausgeschlossen werden, dass in Superzellen und Mehrzellengewittern durch die hohen Aufwindgeschwindigkeiten die Vielzahl an durch Beimpfung zusätzlich eingebrachten Gefrierkerne eine viel größere Zahl

auch an großen Hagelkörnern am Boden hervorbringt, als dies ohne Beimpfung der Fall gewesen wäre. Als Untersuchungsergebnis dieser Arbeit, insbesondere der Ergebnisse der Diskussion der Fälle 1 und 2, darf vermutet werden, dass tatsächlich eine Beimpfung schwächer ausgebildeter Hagelzellen (Einzelzellen) zu einer Verringerung der Hagelkorngröße und Erhöhung der Kornanzahl führt, eine Beimpfung von Super- bzw. Mehrzellengewittern mit starken Aufwindzonen und großen Topshöhen bestenfalls unwirksam bleibt, im Extremfall sogar zu einer Verstärkung von Schadhagel führt.

Diese Untersuchung führt auch zum Ergebnis, dass keines der in Kapitel 4 geschilderten Hagelunterdrückungskonzepte wissenschaftlich seriös verifiziert oder falsifiziert werden kann. Die für diese Arbeit zur Verfügung stehenden Informationen ließen es nicht zu, über die Ausbreitungsdynamik des Silberjodids in der jeweiligen beimpften Wolke Kenntnis zu erlangen. Die Informationen über Bodenhagelmeldungen zeigen zeitliche Ungenauigkeiten, die Größenabschätzungen der Hagelkörner der Beobachter differieren zum Teil stark. Die zuverlässigste Quelle bildeten die ausgewerteten Hageltestplatten.

Für eine exakte phänomenologische Wirksamkeitsprüfung einer Silberjodidimpfung von Wolken anhand eines konkreten Hagelereignisses mit zugeordnetem operativen Hagelabwehreinsatz sind die technischen Möglichkeiten derzeit und wohl auch in naher Zukunft nicht gegeben. Eine exakte Kenntnis der Wolkendynamik und damit der Ausbreitung des AgJ sowie genaue Positions- und Zeitangaben der AgJ-Ausbringung wären erforderlich. Da es nicht möglich ist, die Bodenhagelsituation, die eine bestimmte Wolke hervorruft, ohne erfolgte Beimpfung im Vergleich zu jener mit Beimpfung zu beurteilen, müssten langjährige randomisierte Untersuchungsreihen mit beimpften und unbeimpften Gebieten und jeweils gleichartigen Wolkentypen durchgeführt werden. Da dies der Intention der Hagelabwehr möglichst flächendeckend Schadhagel im Sinne der Landwirtschaft zu verhindern, entgegen steht, erscheint die praktische Umsetzung für die Steiermark schwierig bis unmöglich.

In Kapitel 8 wurden bereits Verbesserungsvorschläge für künftige Hagelabwehrstrategien vorgestellt. Diese sollen hier wiederholt (nach Stasenko, 2000) und ergänzt werden:

- Einsatz von Doppler-Polarisationsradars mit horizontaler und vertikaler Polarisation zu effektiven Erkennung von Radarhagel
- in der Luft befindliche K-Band und X-Band Radars
- neue Instrumente an Flugzeugen, um das Wolkenwasser zu untersuchen
- Einsatz auch von hygroskopischen Fackeln (zur Regenauslösung)
- GPS – Unterstützung zur Flugzeugortung
- Verbesserte Impfsubstanzen (z.B. höherer AgJ-Gehalt bei Fackeln und Raketen; neue Gefrierkomplexe wie $AgCl \cdot I \cdot_x NaCl$, der Komplex $AgClJ \cdot 0{,}5NaCl$, oder $AgJ + 0{,}547\ NaJ + 0{,}416\ C_6H_4Cl_2$) bzw. bessere Effizienz bei der Ausbringung (neue Brenner-Systeme und Fackeln)
- Computerprogramme und neue Radarsysteme zum besseren Verständnis der dynamischen Vorgänge in den Wolken (TITAN, ANTIGRAD, AMRAS)
- Einsatz von „Tracern“ wie z.B. SF_6, um die Ausbreitung der Impfsubstanzen studieren zu können.
- Blitzregistrierung[141] und verbesserte Satelliteninformationen
- verbesserte Hagelvorhersage
- kombinierte Radar- und radiometrische Methoden (zur Wolkentemperaturmessung) zur Erfassung der Zonen mit unterkühlten Tropfen
- Ausbau des Hageltestplattenprogramms auf alle Gebiete, die von den drei steirischen Hagelabwehrbetreibern beflogen werden und in nicht zu befliegenden Vergleichgebieten
- Numerische Modelle zur Simulation der Wolkendynamik, der Hagelbildung und -entwicklung und der Seeding-Effekte

Derzeit gelten die USA und Frankreich als führend in der Forschung zur Verbesserung der aktiven Hagelabwehr. Die Erfüllung oben genannter Punkte könnte es ermöglichen, auch phänomenologisch die Effizienz der Hagelabwehr durch AgJ-Beimpfung zu überprüfen.

[141] In den 1990er Jahren erkannten amerikanische Forscher den Zusammenhang zwischen Polaritätsänderungen der Blitze und starken konvektiven Ereignissen in Wolken. So stellte man fest, dass man aus der Art der Blitze auf die inneren Vorgänge in Wolken schließen kann und damit auch Hagelbildungsprozesse ausmachen kann.

Derzeit sind wohl nur statistische Untersuchungen wie die oben vorgeschlagene Vergleichuntersuchung von beimpften und unbeimpften Gebieten oder wie das seit 1982 bestehende HTP-Programm von O.Svabik (2004), Ziel führend. Die Ergebnisse dieser Svabik-Untersuchung zeigen, dass es wahrscheinlich ist, dass durch Einfluss der Hagelabwehr die Hagelkorngrößen in den 1990er Jahren gegenüber jenen der 1980er Jahre durch Einfluss der AgJ-Beimpfung geringer geworden sind. Seriöserweise muss jedoch vermerkt werden, dass eine ebensolche Entwicklung ohne AgJ-Beimpfung nicht restlos ausgeschlossen werden kann.

In letzter Zeit waren die Bemühungen der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft um technische Verbesserungen von Erfolg gekrönt. Das neue Wetterradar auf der Reicherhöhe, das ab der Saison 2006 den Ist-Zustand der Wolken ohne Zeitverzögerung wiedergeben wird, ist ein Meilenstein. Ebenso wurden Effizienzsteigerungen bei Fackeln und Brennern (höhere Verbrennungstemperatur, sparsamerer Einsatz), die zur Erhöhung der ausgebrachten Eiskeimzahl führten, gegenüber jener Technik, die im Untersuchungszeitraum für diese Arbeit zur Verfügung standen, erreicht. Die verstärkten Kontakte im HVM (Hagelabwehrverbund Mitteleuropa) zum Zwecke des Erfahrungsaustausches, wie in Kapitel 8 geschildert, ist hilfreich. Eine intensivere Zusammenarbeit zwischen den drei steirischen Hagelabwehrbetreibern erscheint wichtig und Ziel führend, da man durch das Einbringen unterschiedlicher Stärken (Südflug führt auch Nachtflüge durch, „hail air“ setzt auch NaCl – Fackeln ein, Hagelabwehrgenossenschaft betreibt das HTP-Programm) Energien bündeln und Synergieeffekte erzielen könnte.

Es bleibt zu hoffen, dass durch weiterführende Langzeituntersuchungen und die Schaffung technischer Möglichkeiten zur Erfassung der Wolkendynamik es möglich sein wird, auch phänomenologisch anhand von Einzelereignissen die Wirksamkeit der Beimpfung von Wolken zur Schadhagelminimierung zu überprüfen. Dieser Nachweis ist im Rahmen dieser Arbeit infolge oben genannter Gründe nicht gelungen. Die Schlussfolgerungen mussten daher als Vermutungen formuliert werden.

17. Quellenverzeichnis

17.1. Literatur

Printmedien:

Beheng K.D. (1993): Theorie und Beobachtungen zur Kinetik von Hydrometeoren, aus: pro met, 23. Jg., Heft 1/2

Beheng K.D., Wacker U. (1993): Über die Mikrostruktur von Wolken, aus: pro met, 23. Jg., Heft 1/2, S. 10 - 15

Breuer H. (1999): Schüttgut vom Himmel, aus: der Spiegel, Nr. 41/1999, S. 352-354

Dessens J. (1997): A Physical Evaluation of a Hail Suppression Project with Silver iodide Ground Burners in Southwestern France, in: Journal of Applied Meteorology, Vol. 37, pp. 1588 - 1599

Emde K. v. d. (1994): Wolkenphysikalische Aspekte der Hagelproblematik, aus: Publ. BZ Raiffeisenhof, Bd. 12, Graz, S. 1 - 7

Finnegan W.G. (1997): Rates and Mechanisms of Heterogeneous Ice Nucleation on Silver Iodide and Silver Chloroiodide Particulate Substrates, in: Journal of colloid and interface science, 202, pp. 518 - 526

Foote G.B. (2000): Recent Developments in Radar and Airborne Particle Probes, WMP Report Series, No. 36, pp. 121 - 138

Hobiger B. (1992): Erstellung von Rechnerprogrammen für die Analyse und Bewertung von Wetterradarbildern im Hinblick auf die Erkennung von Hagelereignissen, Diplomarbeit am Inst. f. Nachrichtentechnik und Wellenausbreitung, TU Graz, Graz, 93 S.

Höller H., Meischner P. F. (1993): Untersuchung von mikro- und makrophysikalischen Strukturen und Prozessen in Hagelwolken im Hinblick auf deren Beeinflussbarkeit, Oberpfaffenhofen, 71 S.

Kämmerer E. (1986): Wettertürme in der Steiermark, aus: Blätter für Heimatkunde, 60.Jg., Heft 2, Graz, 9 S.

Keim et al. R. (1972): Silber und Jod, aus Gmelins Handbuch der anorganischen Chemie, Weinheim, S. 186 - 461

Keßler H. (1994): Umweltmedizinische Aspekte der Hagelabwehr, aus: Publ. BZ Raiffeisenhof, Bd. 12, Graz, S. 12 - 16

Kolb H. (1973): Hagelbekämpfung in Südafrika – ein kurzer Überblick über Forschung und Praxis, aus: Wetter und Leben, Jg. 25, S. 203-211

Kosmus W. (1994): Hagelabwehr und atmosphärische Chemie, aus: Publ. BZ Raiffeisenhof, Bd. 12, Graz, S. 8 - 11

Laube M. (1993): Modelle von Einzelwolken, aus: pro met, 23. Jg., Heft 3, S. 65 - 72

Lazar R. (1994): Niederschlagsverteilungen bei Gewittern mit Hagelereignissen aus synoptisch-geländeklimatischer Sicht, aus: Publ. BZ Raiffeisenhof, Bd. 12, Graz, S. 48 - 49

Lorber F., Domittner K. (Hrsg, 2005): 50 Jahre Steirische Hagelabwehrgenossenschaft, Jubiläumsschrift, Graz, 15 S.

Malberg H. (1997): Meteorologie und Klimatologie, 3. Aufl., Berlin, 354 S.

Müller W. (1973): Hagelabwehr in Slowenien, aus: Wetter und Leben, Jg. 25, S. 175-176

Müller W. (1993): Zur Wirksamkeitsprüfung der aktiven Hagelabwehr, aus: Ber. Inst. Landschafts-Pflanzenökologie Univ. Hohenheim, Heft 2, S. 307-316

Müller W. (1996): Wetterbeeinflussung, Hamburg, 66S.

Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft (Hrsg, 1984): Hagel, München, 57 S.

Orville H. D. et al. (o.J.): A Simplified Concept of Hygroscopic Seeding, in J.Wea.Mod., 28 p.

Pachatz G. C. (1994): Agrar- und Bioklima I + II, Vorlesungsskriptum (Prof. Lazar), Inst. f. Geographie, Uni Graz, S. 127 - 138

Pernter J. M. (Hrsg, 1902): Bericht über die internationale Experten-Conferenz für Wetterschießen in Graz, Anhang zu Jahrbücher der k.k. Central-Anstalt f. Meteorologie u. Erdmagnetismus, Wien, 151 S.

Schiesser H.-H. (1988): Fernerkundung von Hagelschäden mittels Wetterradar untersucht an Ackerkulturen, remote sensing series, Department of Geography, University of Zurich, Zürich, 199 S.

Schiesser H.-H. (1994): Über die Komplexität eine kontrollierten Experimentes in der Hagelabwehr, aus: Publ. BZ Raiffeisenhof, Bd. 12, Graz, S. 17 - 32

Stasenko V. (2000): Hail Suppression: Trends and Perspectives, WMP report series, No. 36, pp. 49 - 59

Stefan C., Kahlig P. (1990): Radarkriterien für das Auftreffen von Hagel am Boden, aus: Wetter und Leben, Jg. 42, S. 5-15

Svabik O. (1989): Review of Meteorological Aspects on Hail Defense Activities in Austria, aus: Theor. Appl. Climatol. 40, S. 247-254

Svabik O. (2004): Hagelabwehr in der Steiermark, 1982-2001, Forschungsbericht der ZAMG, Wien, Oktober 2004

Szith R. (1976): Hagelabwehr heute, Graz, 117 S.

Übeleis M. (2001): Programmsystem für die vergleichende Analyse und Bewertung von Wetterradar-, Hagelbekämpfungs- und Hagelschadensdaten, Weiterentwicklung und Portierung auf Windows NT. Diplomarbeit am Inst. f. Nachrichtentechnik und Wellenausbreitung, TU Graz, Graz 96 S.

Wacker U., Beheng K.D. (1993): Schlagwortverzeichnis zur Wolkenphysik und Wolkendynamik, aus: pro met, 23.Jg., Heft 3, S. 92 - 95

Weischet W. (1995): Einführung in die Allgemeine Klimatologie, 6. Aufl., Stuttgart, 276 S.

Wakonigg H. (1978): Witterung und Klima in der Steiermark, S. 256 - 276

Waldvogel A. (1984): Künstliche Wetterbeeinflussung, RKL, Zürich, 21 S.

Waldvogel A. (1993): Niederschlagsbeeinflussung am Beispiel der Hagelbekämpfung, aus: pro met, 23.Jg., Heft 3, S. 87- 91

Weninger K. (1997): Analyse und statistische Bewertung von Wetterradar-, Hageleinsatz- und Hagelschadensdaten, Diplomarbeit am Inst. f. Nachrichtentechnik und Wellenausbreitung, TU Graz, Graz, 110 S.

Internet:

Der Regenmacher, BBC, dt. Bearbeitung von Ivo Filatsch (1998): http://www.orf.via.at/modern.times/magazin/ausgaben/archiv/mt338.html [03.05.2001]

Eisnukleation: http://www.uni-hohenheim.de/lehre370/weinbau/praktikm/eisnuk.htm [14.04.2001]

hail air: www.hailair.at [Juli 2005]

Hail prevention methods: http://www.hail.csa.fvg.it/morgan/HYGRO.html [26.02.2001]

Orville et.al. (2004): NRC report, http://www.westhermodification.org [August 2004]

OSMER: http://www.osmer.fvg.it [Jänner 2002]

Österreichische Hagelversicherung: www.hagel.at [August 2005]

Statististisches Jahrbuch 2005: Statistik Austria http://www.statistik.at/jahrbuch_2005/pdf/k31.pdf [August 2005]

Steirische Hagelabwehrgenossenschaft: www.hagelabwehr.at [August 2005]

Südflug: www.suedflug.at [Juli 2005]

17.2. Abbildungen und Tabellen

Abbildungen:

Abb. 2.1: Summe der Schadhagelzüge in der Steiermark zwischen 1958 und 1964 nach D. Staud 1965 (aus: Wakonigg, 1978)

Abb. 3.1: Schematische Abbildung der in Hagelwolken stattfindenden mikrophysikalischen Prozesse (nach H. Höller, P. F. Meischner, 1993)

Abb. 3.2: In polarisiertem Licht dargestellter Dünnschliff eines Graupelkorns als Kern mit zahlreichen großen und kleinen Wassertröpfchen, die in stark unterkühltem Zustand einzeln angefroren sind („trockenes Wachstum"), aus: Münchener Rückversicherung, 1984

Abb.3.3: In normalem Durchlicht dargestellter Dünnschliff eines Hagelkorns, das sich um ein gut sichtbares Wolkentröpfchen gebildet hat, wobei die zahlreichen Schalen durch Anfrieren eines Wasserfilms entstanden sind („nasses Wachstum"), aus: Münchener Rückversicherung, 1984

Abb.3.4: Das größte in München nachgewiesene Hagelkorn, das im Zuge des Hagelsturmes vom 12.7.1984 zu Boden fiel: 9 cm Durchmesser, 300g; aus: Münchener Rückversicherung, 1984

Abb. 3.5: Böenwalze eines Frontgewitters (Quelle: unbekannt)

Abb.3.6: Links: Amboss des Cb des Münchener Hagelsturms vom 12.7.1984, rechts: Cb über München (beide Fotos aus: Münchener Rückversicherung, 1984)

Abb. 3.7: Schematische Darstellung eines Einzelzellengewitters; aus H. Höller, P. F. Meischner, 1993.

Abb. 3.8: Schematische Darstellung eine Mehrzellengewitter; aus: H. Höller, P. F. Meischner, 1993.

Abb.3.9: Schema eines Superzellengewitters; aus H. Höller, P. F. Meischner, 1993.

Abb. 5.1: Anzahl der gebildeten Eiskristalle (Gefrierkerne) in Abhängigkeit von der Temperatur für Produkte von AgJ-Generatoren (aus: H. Höller, P. F. Meischner, 1993)

Abb. 5.2: Schematische Darstellung der Verteilung von AgJ in isolierten Zellen (aus: H. Höller, P. F. Meischner, 1993)

Abb.6.1.: Wetterkreuze am Saukogel /Sommeralm (Grazer Bergland, Steiermark, aufgenommen am 14.07.2005)

Abb. 6.2.: Wettertürme (aufgenommen im Sommer 2003), von links nach rechts: Niederschöckel, Rinegg, Schaftalberg

Abb. 6.3.: Links: Bölleranlagen, rechts: Kavitationsanlage (aus: Pernter, 1902)

Abb. 6.4.: Hagelabwehrzentrale in Zikarce bei Marburg (Slowenien), im Vordergrund eine mobile Abschussrampe für CAKO – Raketen, im Hintergrund ein mobiles Radargerät, (aus: Szith, 1976)

Abb. 6.5.: Links: Raketenabschussrampe mit mobilem Radar (Steiermark), links: Instandsetzung eines Bodengenerators (Steiermark), aus: Lorber, Domittner, 2005

Abb. 7.1.: Bodengenerator in der Steiermark um 1965 – 1970 (aus: Szith, 1976)

Abb. 7.2.: Fackeln der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft (aufgenommen am 20.08.2001)

Abb. 10.1.: Karte der südlichen Steiermark. Die Punkte markieren die Standorte der Bodengeneratoren (zur Verfügung gestellt von H. Gobec)

Abb. 10.2.: Einsatzflugzeug der „hail air“ mit Brenner, AgJ-Fackeln (unten) und NaCl-Fackeln (oben), entnommen der hail-air-Homepage am 21.8.2005.

Abb. 11.1.: Von links nach rechts: Brenner, Brenner und Fackeln, Tank für die AgJ-Aceton-Lösung eines Flugzeuges der Hagelabwehrgenossenschaft (aufgenommen am 20.8.2001)

Abb. 12.1.: Satellitenbild von Österreich, die südliche Steiermark ist mit Wolken bedeckt. NOAA/DLR Überflug vom 3.8.2000, 15:13 UTC, Kanäle 1+2, zur Verfügung gestellt von der ZAMG-Regionalstelle Graz-Thalerhof

Abb. 12.2.: Abschattungsdiagramm für die 4 Wetterradars der Austro Control (von links nach rechts: Innsbruck, Salzburg, Zirbitzkogel, Schwechat), sichtbarer Bereich für Regenzellen, die eine Höhe von mindestens 1500 Meter über Grund erreichen, aus: Köck, 1999

Abb. 12.3.: Wetterradarblockschaltbild, stark vereinfacht, aus: Köck, 1999

Abb. 12.4: Hagelgewitter über Graz, mit Topshöhe 12 km, Höhe maximaler Intensität (Stufe 12) in 3000 – 6000 m (Bild von der TU Graz 2004 zur Verfügung gestellt).

Abb. 12.5.: Wetterradarturm (links) und Radarschirmdarstellung (Quelle: www.hagelabwehr.at, 2005)

Abb. 12.6.: Links: Messstationsgerüst ohne Platten (Roseggerweg , Graz – Nordost, aufgenommen am 3.11.2001) und rechts Messstation mit Platten (aus: Svabik, 1989)

Abb. 12.7.: Karte des Hageltestplattengebietes Weiz-Gleisdorf („STK“), zur Verfügung gestellt von O. Svabik, ZAMG Wien

Abb. 12.8: Bezeichnungen der HTP-Stationen im Gebiet STK (zur Verfügung gestellt von O. Svabik, ZAMG Wien)

Abb. 12.9.: Karte des Hageltestplattengebietes Radkersburg („RAD“), zur Verfügung gestellt von O. Svabik, ZAMG Wien

Abb. 12.10.: Bezeichnungen der HTP-Stationen im Gebiet STK (zur Verfügung gestellt von O. Svabik, ZAMG Wien)

Abb. 12.11.: HTP-Hagelschadensmeldung, zur Verfügung gestellt von der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft

Abb. 12.12: Hagel-Schadensmeldekarte („Gemeindemeldungen“), zur Verfügung gestellt von der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft

Abb. 12.13.: Ertragsminderung bei verschiedenen Kulturen und Energiewerten (Svabik, 2004)

Abb. 12.14: Jährliche Schadensverläufe für die Gerichtsbezirke Gleisdorf und Deutschlandsberg (A = Ausgaben, E = Einnahmen), aus Svabik, 2004

Abb.12.15.: Hagelkörner und Schadhagelauswirkung in South Dakota, USA (aus: Der Spiegel, Nr.41, 1999)

Abb.13.1: Radarbild aus dem „Hobiger-Programm“, Quelle:Bildschirm mit vom Autor eingegebenen Daten)

Abb.13.2: Ausschnitt des Radarschirms mit ausgeblendeten Intensitätsstufen, eingeblendetem Seeding-Bereich und der GPS-Route des Flugzeugs (aus: Weninger, 1997)

Abb.13.3: Darstellung des Radarschirms mit Bedienelementen im neuen „Übeleis-Programm“; Intensitäten, mehrere Zugpfade, Hagelkartenmeldungen, HTPs, Brenner und Fackelgebiete sind zu sehen. (aus: Übeleis, 2001)

Abb. 14.1.: Radarbild (8-teilige Skala) des Wetterradars Zirbitzkogel um 16:15 MESZ, Grundriss, Seitenrisse, vgl. Abb. 12.4., zur Verfügung gestellt von der TU Graz

Abb. 14.2.: Radarbild vom Zirbirtzkogel, das ins Hobiger / Weninger – Programm übernommen wurde mit im Vergleich zu Abb. 14.1 zusätzlicher Darstellung des Gewitterzugpfades, des Hagelradius‘ und der von der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft beseedeten Gebiete um 16.15 MESZ

Abb. 14.3.: Radarbild mit Ausweisung der beimpften Flächen um 16:35, maximale Intensität in 3000 – 5000 m Höhe. Darstellung wegen besserer Lesbarkeít erst ab Intensitätsstufe 4.

Abb. 14.4: Vergleich der Radarbilder von Schwechat und vom Zirbitzkogel zum selben Zeitpunkt (19:35 UTC, 3.8.2002).

Tabellen:

Tab.2.1: Zahl der Einsatztage mit AgJ und Anzahl der Einsätze mit AgJ im Einsatzgebiet der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft (Quelle: St. Hagelabwehrgenossenschaft)

Tab. 3.1: Größe und Fallgeschwindigkeit von Hydrometeoren (aus: H. Malberg, 1997)

Tab. 5.1: AgJ-Verbrauch in Liter und Fackelverbrauch im Zeitraum 1991 – 2002 der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft nach deren Angaben.

Tab. 12.1.: Von 1991 – 1998 verwendete 8 – teilige Intensitätsskala auf Radarbildern der vier großen österreichischen Wetterradars mit Angabe der Reflektivitätswerte und der Regenrate in Wolkensystemen.

Tab. 12.2.: Seit 1999 verwendete 14 – teilige Intensitätsskala auf Radarbildern der vier großen österreichischen Wetterradars mit Angabe der Reflektivitätswerte und der Regenrate in Wolkensystemen.

Tab. 12.3.: Hageltage, HTP mit Hagel, Energiewerte und Ertragsminderungen im Zeitraum 1982 – 2001 (Svabik, 2004).

Tab. 12.4: Wie Tab. 12.3 für das Jahr 2002 (Svabik, 2004)

Tab. 12.5.: Hagelschäden (auch leichte ohne volle Ertragsminderung) in Prozent bei verschiedenen Kulturen und Energiewerten. Quelle: Steirische Hagelabwehrgenossenschaft, 1992 (aus: Pachatz, 1994)

Tab. 12.6.: Schadensaufwendungen (Schadensverlauf = A/E in Prozent) der ÖHV für die Gerichtsbezirke Gleisdorf und Deutschlandsberg für die Jahre 1991 – 2001, zur Verfügung gestellt von O. Svabik

Tab. 14.1.: Gegenüberstellung aller Fallbeispiele nach Vorhandensein von Radarhagel, Bodenhagel und Seeding.

Tab. 14.2.: Charakterisierung der Gewitterentwicklung laut Wetterradar Schwechat und Zirbitzkogel, chronologisch und mit Planquadratangabe

Tab. 14.3.: Chronologischer Ablauf der Seedingtätigkeit am 26.6.1991 nach Planquadraten

Tab. 14.4: Klimastationsdaten der Stationen, die im Gewittereinzugsgebiet lagen, zur Verfügung gestellt von der ZAMG- Regionalstelle Graz - Thalerhof

Tab. 14.5: Auswertung der HTP-Stationen für den 26.06.1991 im Gebiet STK und RAD, für Deckplatte und Seitenplatten, Kornklassenspektren, Einschlagswinkel und Richtung der Hagelkörner, sowie Auftreffenergie pro m² (aus: O. Svabik, 2004)

Tab. 14.6.: Am 26.6.1991 getroffene HTP's im Gebiet STK, (Tabelleninhalt selbsterklärend)

Tab. 14.7.: Am 26.6.1991 getroffene HTP's im Gebiet RAD, (Tabelleninhalt selbsterklärend)

Tab. 14.8.: Gegenüberstellung der ZAMG-Daten und der Daten der HTP-Karten

Tab. 14.9.: Hagelkarten (Gemeindemeldungen) vom 26.9.1991, Inhalt selbsterklärend

Tab.14.10: Chronologische Radarcharakterisierung nach Planquadraten vom 23.8.1994

Tab. 14.11.: Zeitlicher Vergleich der maximalen Intensitäten und Topshöhen zweier Zugpfade vom 23.8.1994.

Tab. 14.12: Seedingtätigkeit am 23.8.1994

Tab. 14.13.: Klimastationsdaten der Stationen, die im Gewittereinzugsgebiet lagen, zur Verfügung gestellt von der ZAMG- Regionalstelle Graz - Thalerhof

Tab. 14.14.: Radarbildcharakterisierung der Bilder von Schwechat und vom Zirbitzkogel vom 3.8.2002.

Tab. 14.15: Charakterisierung der Radarbilder vom Zirbitzkogel vom 3.8.2002, ab 22:05

Tab. 14.16.: Klimastationsdaten der Stationen, die im Gewittereinzugsgebiet lagen, zur Verfügung gestellt von der ZAMG- Regionalstelle Graz - Thalerhof

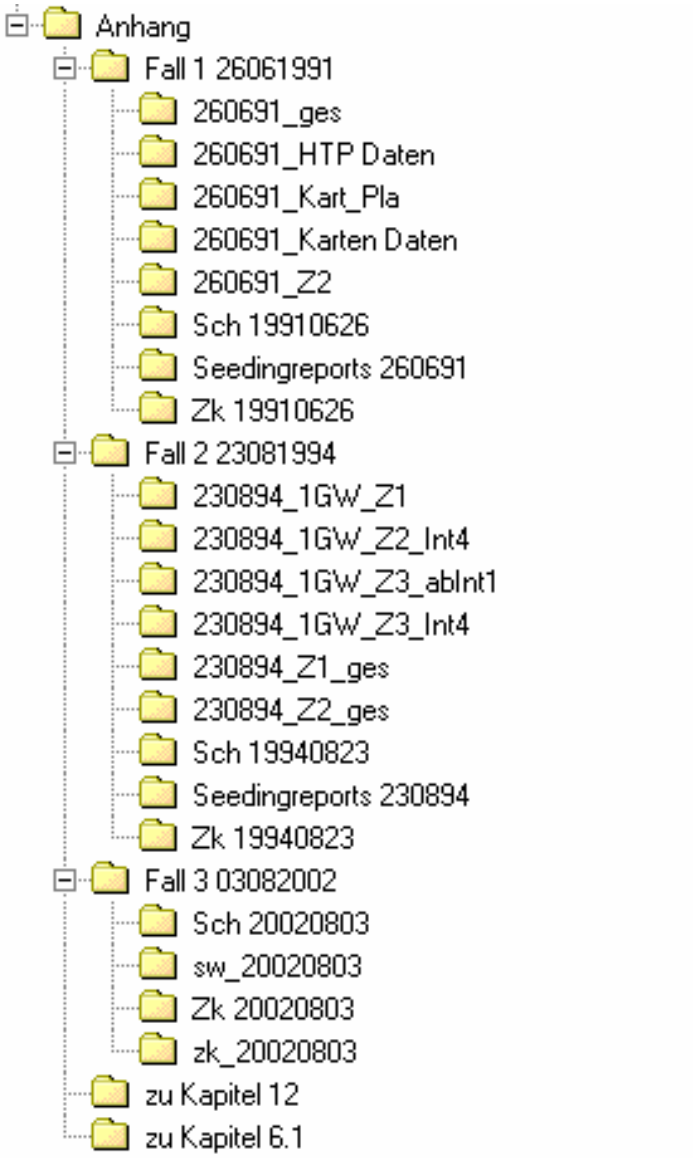
Tab. 15.1.: Chronologischer Vergleich von Radarintensitätsmaxima, Seeding und Bodenhagelmeldungen vom 26.6.1991

Tab. 15.2.: Zeitliche Gegenüberstellung von Radarintensitäten und Seeding vom 23.8.1994

Anhang

Der Anhang wird ausschließlich in elektronischer Form auf einer CD beigelegt, da der große Umfang der beigelegten Daten, so sind sämtliche Radarbilder aller diskutierter Fälle beigelegt, eine Druckversion unmöglich und nicht sinnvoll machen.

Die Gliederung des Anhanges wurde wie folgt vorgenommen:



Zum Inhalt:

Die vorliegende Arbeit besteht aus einem umfangreichen theoretischen Teil, der neben den geländeklimatologisch - meteorologischen Voraussetzungen für Hagelwetterlagen die wolkenphysikalischen Prozesse hinsichtlich der Hagelbildung und die Hypothesen zur Hagelunterdrückung beinhaltet. Besonders ausführlich werden die unterschiedlichen Impfhypothesen und die Wirkung des Silberjodids diskutiert. Es folgt ein umfangreicher Teil zur historischen Entwicklung der Hagelabwehr in der Steiermark und eine Betrachtung der gegenwärtigen Situation.

Der direkte Untersuchungszeitraum erstreckte sich von 1991 – 2002. Für diesen Zeitraum wurden alle (Hagel-)Gewitterereignisse studiert. Schließlich wurden drei Fälle, die sich hinsichtlich Radarhagel, Bodenhagel und Seeding unterschieden und für die am meisten Daten vorhanden waren, eingehend durch Gegenüberstellung von Einfluss- und Wirkungsgrundlagen untersucht und diskutiert. Dabei zeigte sich, dass das vorhandene Wissen um die dynamischen und mikrophysikalischen Prozesse in Gewitterwolken und die technischen Möglichkeiten nicht ausreichen, um die Ausbreitung der Impfsubstanz Silberjodid in den Wolken klar nachvollziehen zu können. Dazu kommen lückenhafte Datensätze bei Radarbildern und Schadhagelmeldungen.

Als wichtiges Ergebnis dieser Arbeit muss festgehalten werden, dass eine phänomenologische Überprüfung der Wirksamkeit der Wolkenbeimpfung mit Silberjodid durch Flugzeuge der Steirischen Hagelabwehrgenossenschaft am konkreten Einzelhagelereignis nicht möglich ist. Die jüngsten Verbesserungen (neues Wetterradar, bessere Generatortechnik) sind jedoch ein Schritt in die richtige Richtung. Eine weitere phänomenologische Untersuchung erscheint in Zukunft bei besserer Kenntnis der Wolkendynamik sinnvoll, was derzeit (noch) nicht möglich ist. Die Weiterführung der langjährigen statistischen Untersuchung der Bodenhagelsituation ist hingegen stark zu befürworten.

Wegener Zentrum für Klima und Globalen Wandel
Karl-Franzens-Universität Graz
Leechgasse 25
8010 Graz, Austria
www.wegcenter.at
ISBN 3-9502126-0-4