

Ludwig Maximilians-Universität München

Fakultät für Geowissenschaften

Bachelorarbeit

**Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Science**

Eingereicht am Department für Geographie

Anwendungen des Cloud Seeding im methodischen und regionalen Vergleich

Application of Cloud Seeding in methodological and regional comparison

Verfasserin:

Hannah Scheicher
Ignaz-Günther-Str. 10b; 83607 Holzkirchen
h.scheicher@gmx.de

Betreuer:

Prof. Dr. Ralf Ludwig

Abgabedatum: 21.06.2018

I. Inhaltsverzeichnis

I.	Inhaltsverzeichnis	I
II.	Abbildungsverzeichnis.....	III
III.	Tabellenverzeichnis.....	IV
1.	Einleitung.....	1
1.1.	Motivation	1
1.2.	Methodik.....	2
1.3.	Stand der Forschung	3
2.	Bestandsanalyse – Methoden, Geschichte und regionale Beispiele des Cloud Seedings... 5	
2.1.	Wolken und Niederschlagsbildung.....	5
2.2.	Geschichte des Cloud Seedings	9
2.3.	Methoden des Cloud Seedings	11
2.3.1.1.	Statisches Cloud Seeding	11
2.3.2.	Dynamisches Cloud Seeding.....	14
2.3.3.	Hygroskopisches Cloud Seeding.....	17
2.4.	Einsatzbereiche des Cloud Seedings	19
2.4.1.	Statisches Cloud Seeding zur Hagelabwehr in Bayern	19
2.4.1.1.	Natürliche Gegebenheiten.....	19
2.4.1.2.	Schäden durch Hagelstürme.....	22
2.4.1.3.	Geschichte der Hagelabwehr in Bayern.....	23
2.4.1.4.	Durchführung einer Hagelabwehr Operation.....	25
2.4.1.5.	Aktuelle Entwicklungen.....	27
2.4.1.6.	Zunahme der Hagelschläge.....	27
2.4.2.	Hygroskopisches Cloud Seeding zur Wassergewinnung in den VAE	29
2.4.2.1.	Natürliche Gegebenheiten.....	29
2.4.2.2.	Wasserversorgung der VAE.....	31

2.4.2.3.	Geschichte des Cloud Seedings in den VAE	33
2.4.2.4.	Durchführung des Cloud Seedings	35
2.4.2.5.	Aktuelle Entwicklung des Cloud Seedings in den VAE.....	37
2.4.2.6.	Entwicklung der Wasserversorgung in den VAE	37
3.	Potenzialanalyse – Kritikpunkte des Cloud Seedings.....	38
3.1.	Nachweisbarkeit der Effizienz.....	38
3.2.	Auswirkungen auf die Umwelt.....	42
3.2.1.	Rückstände des Cloud Seeding Materials	42
3.2.1.1.	Silberjodid.....	42
3.2.1.2.	Lösliche Hygroskopische Materialien	45
3.2.1.3.	Unlösliche Hygroskopische Materialien.....	45
3.2.2.	Ausbleiben der Regenfälle in angrenzenden Gebieten.....	46
3.2.3.	Auswirkungen des Veränderten Niederschlagshaushalts auf dieUmwelt.....	48
4.	Diskussion:.....	49
5.	Fazit.....	55
IV.	Literaturverzeichnis.....	I
V.	Anhang 1:.....	VIII
VI.	Anhang 2	XI

II. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zeittafel des Projektverlaufs	3
Abbildung 2: Eine generalisierte Darstellung der verschiedenen Wolkengattungen	6
Abbildung 3: Kollision und Koaleszenz bei (a) Kleinen und (b) großen Wolkentröpfchen.....	7
Abbildung 4: Schematische Darstellung des Bergeron-Findeisen Prozesses	8
Abbildung 5: Konzeptuelles Modell des Dynamischen Cloud Seeding für Cumulus Wolken im Vergleich zu einer unmodifizierten Cumulus Wolke	16
Abbildung 6: Hagelhäufigkeit innerhalb Deutschlands	20
Abbildung 7: Entstehung eines Hagelkorns	22
Abbildung 8: Hagelkorn >9cm 1984 München.....	23
Abbildung 9: Beschädigtes Haus nach dem Münchner Hagelunwetter 1984	23
Abbildung 10: Einsatzgebiete der Hagelabwehr Rosenheim, orange markiert.....	25
Abbildung 11: Flugzeug GITY der Hagelabwehr Rosenheim.....	27
Abbildung 12: Veränderungen des Potentiellen Hagel Indexes (PHI) zwischen 2021-2050 und 1971-2000 repräsentiert durch sieben Klimasimulationen (a) Anzahl der Simulationen die eine Vergrößerung des PHI prognostizierten (b) mindestens fünf der sieben Simulationen haben eine signifikante Änderung angezeigt	28
Abbildung 13: Kare der Vereinigten Arabischen Emirate	29
Abbildung 14: Wasserverbrauch in den VAE	32
Abbildung 15: Hatta Damm	33
Abbildung 16: Fackeln an der Unterseite von Tragflächen	35
Abbildung 17: Durchführung einer Hygroskopischen Cloud Seeding Operation	36
Abbildung 18: Hageltestplattenstation	40
Abbildung 19: Lage der landwirtschaftlichen Regionen, welche betroffen sind vom Cloud Seeding A1 und A2 und den Kontrollregionen C1, C2, C3.....	44
Abbildung 20: Wasserverteilung innerhalb eines natürlichen Wolkensystems und eines geseedeten Wolkensystems	48

III. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gegenüberstellung aller drei Fallbeispiele nach Vorhandensein von Radarhagel, Bodenhagel und Seeding	41
Tabelle 1: Ergebnisse der Abwind Messung in Utah	47

1. Einleitung

1.1. Motivation

Aufmerksam auf das Thema Cloud Seeding wurde die Autorin bei einem Besuch des Emirats Dubai, in dem Cloud Seeding zur Gewinnung höherer Niederschläge angewandt wird. Die Autorin selbst ist im Landkreis Miesbach wohnhaft in welchem Cloud Seeding auch seit mehreren Jahrzehnten zur Hagelabwehr betrieben wird. Von Interesse für sie war es inwieweit die Methode zur Modifikation des Wetters in diesen klimatisch völlig unterschiedlichen Gebieten eingesetzt werden kann, wie effizient die Maßnahme ist und ob es eventuelle Nachteile gibt.

Seit jeher war das Wetter für den Menschen ein unkontrollierbares Naturphänomen.

Nur indirekt konnte er sich mit präventiven Maßnahmen gegen Naturgewalten schützen, wie beispielsweise dem Bau von Dämmen gegen Hochwässer. Meistens stand er jedoch Ereignissen, wie Hagelschauern oder langanhaltenden Dürren machtlos gegenüber. Man kann davon ausgehen, dass der Mensch schon lange den Wunsch hegte in der Lage zu sein, das Wetter nach Wunsch und Bedarf regulieren zu können.

Früher beliefen sich die Gegenmaßnahmen auf Gebete oder magische Praktiken. So versuchte man häufig schlechtes Wetter durch Schießen „abzuschrecken“. Sogenanntes Hagelschießen wie in Bayern kann bereits seit dem 17. Jh. nachgewiesen werden.

Im Laufe des 20. Jh. erlangte man, durch immer besser werdende Messmethoden, allmählich Erkenntnisse über Prozesse innerhalb der Wolken. In den 40er und 50er Jahren konnte man nachweisen, dass Stoffe, wie Silberjodid oder Bleijodid, als Ersatz-Nucleus zur Tröpfchenbildung in Wolken dienen können. Seitdem wird Cloud Seeding in zahlreichen Ländern angewandt, um in das Wettergeschehen einzugreifen.

Die Anwendungsbereiche des Cloud Seeding sind vielfältig. Sie reichen von der Hagelprävention bis hin zur Auflösung von Schlechtwetterfronten um gute Witterungen für sportliche Großereignisse zu garantieren, wie z.B. 2008 bei den Olympischen Sommerspielen in Peking geschehen. Hauptsächlich wird es aber eingesetzt, um einen höheren Niederschlag zu generieren.

Trotzdem Cloud Seeding seit bereits über 50 Jahren angewandt wird, sind viele Fragen noch nicht vollständig geklärt. Gerade im Bezug auf die Effizienz der Methode, gibt es in der

Wissenschaft unterschiedliche Ansichten. Auch zu bedenken sind die möglichen Auswirkungen auf die Umwelt durch das Ausbringen der benötigten chemiekalischen Stoffe. Ist es möglich, dass diese mit dem Regen wieder nach unten transportiert werden und sich im Boden oder in Gewässern anreichern. Es stellt sich auch die Frage, ob Cloud Seeding negative Effekte auf den Niederschlag in einer benachbarten Region haben könnte. Kann der künstlich induzierte Niederschlag bewirken dass der Regen in angrenzenden Gebieten reduziert wird, nach dem Prinzip „Man stiehlt von Peter, um Paul zu bezahlen“.

Mit diesen Problemstellungen beschäftigt man sich derzeit in der Forschung und auch mit dem Ziel die Methoden des Cloud Seedings weiterhin zu verbessern. Gerade mit Hinblick auf den Klimawandel stellt sich die Frage, ob dies ein Lösungsansatz sein kann, um auf extremer werdende Wetterereignisse und Wasserknappheit zu reagieren.

In der Bestandsanalyse dieses Berichtes werden zuerst grundlegende Informationen den unterschiedlichen Methoden und Anwendungsbereichen des Cloud Seedings geben.

Anschließend werden folgende Fragen behandelt:

1. Inwieweit kann die Effizienz der Methode des Cloud Seedings wissenschaftlich nachgewiesen werden?
2. Bestehen eventuelle Risiken für die Umwelt und den Menschen?

Letztendlich wird noch kurz darauf eingegangen, ob Cloud Seeding, auf Grund des Klimawandels, häufiger zum Einsatz kommen wird.

1.2.Methodik

Inhaltlich basiert diese Arbeit vor allem auf der Literaturrecherche.

Die Bücher wurden zum Teil dem Bestand der Bibliotheken der Ludwig-Maximilians Universität entnommen. Wissenschaftliche Berichte wurden entweder über das Opac-Verzeichnis oder mit Hilfe von Research Gate oder Google Scholar gefunden.

Die recherchierten Texte wurden inhaltlich analysiert und zusammengefasst, soweit sie die Themen der Bachelorarbeit behandeln. Die gewonnenen Informationen bilden die wissenschaftliche Basis des Berichts.

Des Weiteren wurde ein Interview mit einem Experten des Fachbereichs Hagelbekämpfung durchgeführt. So fand am 28.05.2018 ein Gespräch mit Herrn Georg Vogl im Landratsamt Rosenheim statt. Herr Vogl ist der Einsatzleiter der Hagelabwehr und bereits seit über 30

Jahren in der Rosenheimer Hagelabwehr tätig. Auch ist er der Geschäftsführer des dortigen Hagelforschungsvereins. Er verfügt somit im Bezug auf das Themas Cloud Seeding zur Hagelabwehr über umfangreiche Erfahrungen und Fachwissen. Das Interview wurde anschließend transkribiert und ist in Anhang 2 vorzufinden. In Anhang 2 befindet sich der von Herrn Vogl beantwortete Fragebogen, welcher ihm im Vorfeld des Interviews via Email zugeschickt wurde.

Abschluss der Bestands- und die Potenzialanalyse des Berichts ist die Diskussion.

Beendet wird der Bericht mit einer knappen Zusammenfassung des aktuellen Stands und einem kurzen Ausblick in die Zukunft.

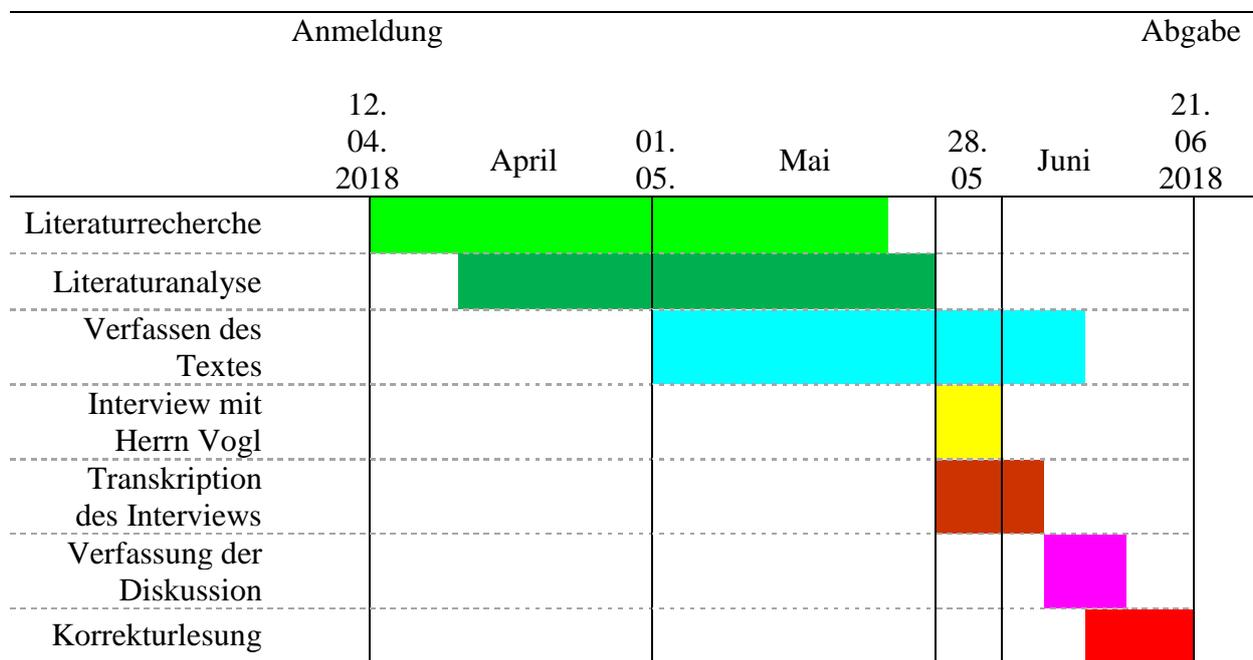


Abbildung 1: Zeittafel des Projektverlaufs (Eigene Abbildung)

1.3.Stand der Forschung

Die für den Bericht verwendete Literatur baut zum einen auf Standardwerken auf, wie Cotton & Pielkes Buch „Human Impacts on Weather and Climate“.

Zum anderen wurde ein Großteil der Informationen aus Fachartikeln entnommen. Es konnte festgestellt werden, dass bei den wissenschaftlichen Untersuchungen gerade im Bezug auf die Umweltverträglichkeit des eingesetzten Seeding Materials, zum Teil unterschiedliche

Aussagen gemacht wurden. Dies lässt sich eventuell durch anderen Untersuchungsmethoden oder verschiedene Interessensansätze begründen.

Des Weiteren wurde auch auf die entsprechenden Webseiten diverser Organisationen zurückgegriffen. Um Auskunft über das Rain Enhancement Programm in den VAE zu erhalten wurden Daten der projekteigenen Website (<http://www.uaerep.ae/>) verwendet. Informationen über die Hagelabwehr in Rosenheim wurden auch der Website der Hagelabwehr (<http://www.hagelabwehr-rosenheim.de/>) oder dem Interview mit Herrn Georg Vogl entnommen. Zu bedenken ist in beiden Fällen, dass die gewonnenen Daten keinen objektiven Stand der Dinge wiedergeben.

Für die Untersuchung der Effizienz wurde die Studie von Herrn Panchartz und Herrn Svabik auf Empfehlung von Herrn Vogl zu Hilfe genommen.

Allgemein wurde versucht den Text auf den Daten möglichst aktueller Studien aufzubauen. Teilweise wurde jedoch auf ältere Literaturquellen zurückgegriffen. Auch, weil diese in neueren Forschungsarbeiten als Literaturquellen angegeben waren wie z.B. Dennis Buch „Weather Modification by Cloud Seeding“ aus dem Jahr 1980.

Aktuelle Forschungsprojekte zur Verbesserung des Cloud Seedings, sind da Projekt ROBERTA in Rosenheim oder das Rain Enhancement Programm in den VAE. Diese beiden Fälle werden im folgenden Textverlauf nochmals genauer beleuchtet.

Weltweit gesehen gibt es viele Projekte, die sich mit der Optimierung der Cloud Seeding Methode auseinandersetzen.

Vorreiter im Bezug auf Forschungsprojekte sind die USA. Dort befasst sich die Weather Modification Association mit der Weiterentwicklung der Wetterbeeinflussung, der Regenvermehrung und der Hagelabwehr.

2. Bestandsanalyse – Methoden, Geschichte und regionale Beispiele des Cloud Seeding

2.1. Wolken und Niederschlagsbildung

Wolken sind das sichtbarste Anzeichen atmosphärischer Prozesse. Sie geben Auskunft über die atmosphärische Stabilität, die Höhenströmung und den kommenden Wetterverlauf.

Sie werden gebildet durch die Kondensation und Sublimation von Wasserdampf. Für die Wolkenbildung muss die Luft mit Wasserdampf gesättigt sein und Aerosole d.h. feste und luftgetragene Teilchen enthalten.

Um Wolken in verschiedene Gruppen einzuteilen, kann dies entweder anhand der genetischen oder der morphologischen Klassifikation erfolgen.

Bei der genetischen Klassifikation wird auf die Art der Entstehung eingegangen. Meistens bilden sich Wolken durch die Vertikalbewegung von Luftpartikeln und einer damit einhergehenden adiabatischen Abkühlung unterhalb des Taupunktes. Diese Vertikalbewegungen ereignen sich durch das Aufgleiten warmer Luft über kalte Luftmassen. Dies geschieht entweder anhand von thermischer Konvektion, durch das Aufsteigen von Luftmassen an orographischen Hindernissen oder durch Turbulenzen am Erdboden, wodurch es zur ungeordneten Hebung von Luftpaketen kommt.

Die morphologische Klassifikation berücksichtigt das äußere Erscheinungsbild einer Wolke. Darunter fällt die Form, die Struktur, die vertikale Erstreckung und die Höhe der Wolkenbasis (Klose 2008, 117ff.). Die Höhe wird ausgehend von der Wolkenuntergrenze festgelegt (Häckel 2016, 111). Insgesamt unterscheidet man zwischen drei verschiedenen Wolkenstockwerken. Die unterste Schicht reicht bis in eine Höhe von 2-4km, Wolken innerhalb dieser Schicht enthalten nur flüssige Tröpfchen. Das mittlere Stockwerk enthält ein Gemisch aus flüssigen Tröpfchen und Eiskristallen und erreicht 5-8km Höhe. In der obersten Schicht, 12-16 km, sind nur reine Eiswolken vorzufinden (Glaser 2013, 251). Aufgrund von Temperaturveränderungen variieren diese gewählten Höhenstufen je nach Jahreszeit und Klimazone. Wolken innerhalb des obersten Stockwerks werden als Cirrus Wolken bezeichnet, Wolken des mittleren Stockwerks als Alto Wolken und tiefe Wolken des untersten Stockwerks besitzen keine eigene Vorsilbe. Des Weiteren unterscheidet man noch zwischen haufen-, schicht- und schleierförmigen Wolken. Haufenwolken nennt man Cumulus Wolken, Schichtwolken werden als Stratus Wolken bezeichnet und da schleierförmige Wolken nur in

der obersten Wolkenschicht vorkommen, bezeichnet man sie schlicht als Cirrus (Häckel 2016, 111ff.).

Es gibt auch Wolken, die sich über mehrere Stockwerke erstrecken. Die Nimbostratus Wolken reichen von der unteren bis in die mittlere Wolkenstufe und sorgt für dauerhafte Niederschläge. Die Cumulonimbus Wolke umfasst alle drei Stockwerke und reicht bis an die Tropopause. Diese Wolkengattung bringt eher kurzfristige Schauer und Gewitter (Glaser 2013, 251).

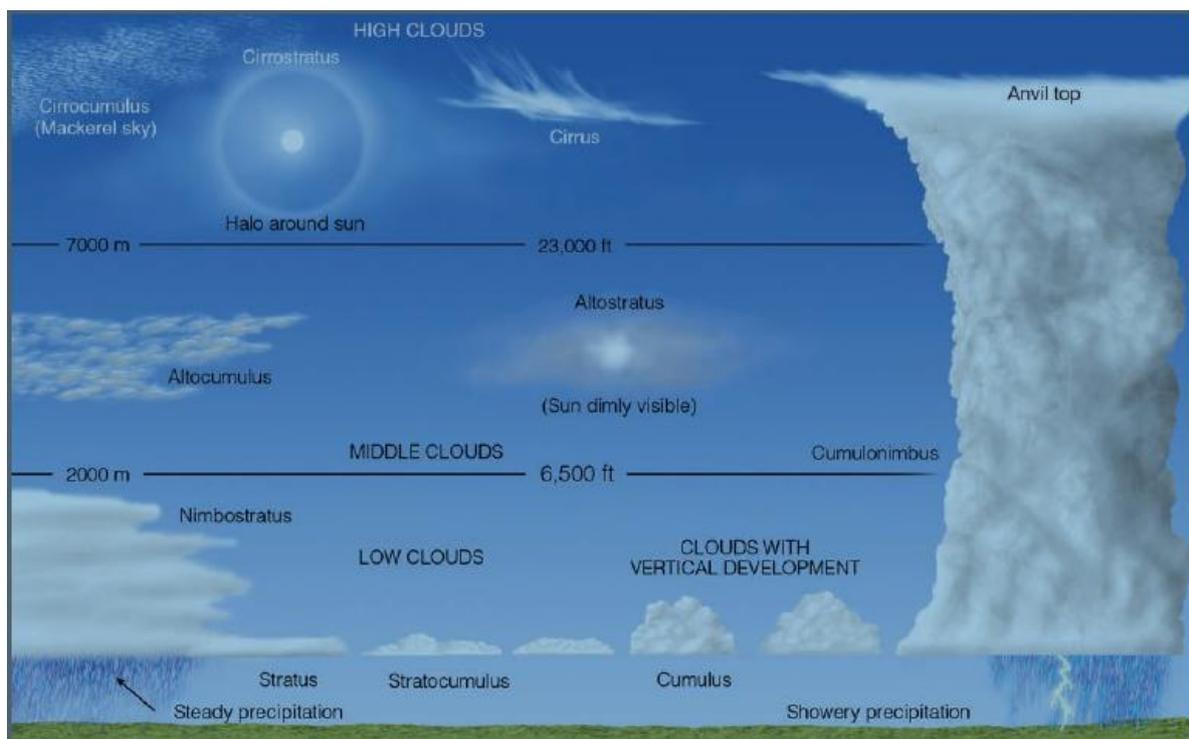


Abbildung 2: Eine generalisierte Darstellung der verschiedenen Wolkengattungen (Ahrens 2007, 128)

Insgesamt kann man davon ausgehen, dass nur aus 1% aller Wolken weltweit Niederschlag fällt (Klose 2008, 117). Von Bedeutung für die Methode des Cloud Seeding ist nun die Frage, wie der Prozess der Niederschlagsbildung in einer Wolke verläuft.

Einer Theorie zu Folge läuft der Wachstumsprozess der Wolkentropfen auf Basis der Koaleszenz ab. Hierbei kollidieren Wolkentropfen zufällig miteinander und fusionieren.

Dieser Prozess der Regentropfenbildung benötigt jedoch eine außerordentlich hohe Luftfeuchtigkeit, welche zumeist nur in den Tropen gegeben ist. In den Mittleren und Hohen Breiten könnte sich nach diesem Prinzip nur Nieselregen bilden (Häckel 2016, 126). Auch

benötigen diese Wolken ein breiteres Spektrum an Wolkentröpfchengrößen. Besitzt eine Wolke nur kleine Tröpfchen, fallen diese alle in derselben Geschwindigkeit und es ist unwahrscheinlich, dass sie kollidieren. Kommen aber unterschiedliche Größen vor, fallen die größeren Wolkentröpfchen schneller, kollidieren dabei auf dem Weg nach unten mit kleineren Wolkentröpfchen und es kann zur Koaleszenz kommen (Ahrens 2007, 168f.).

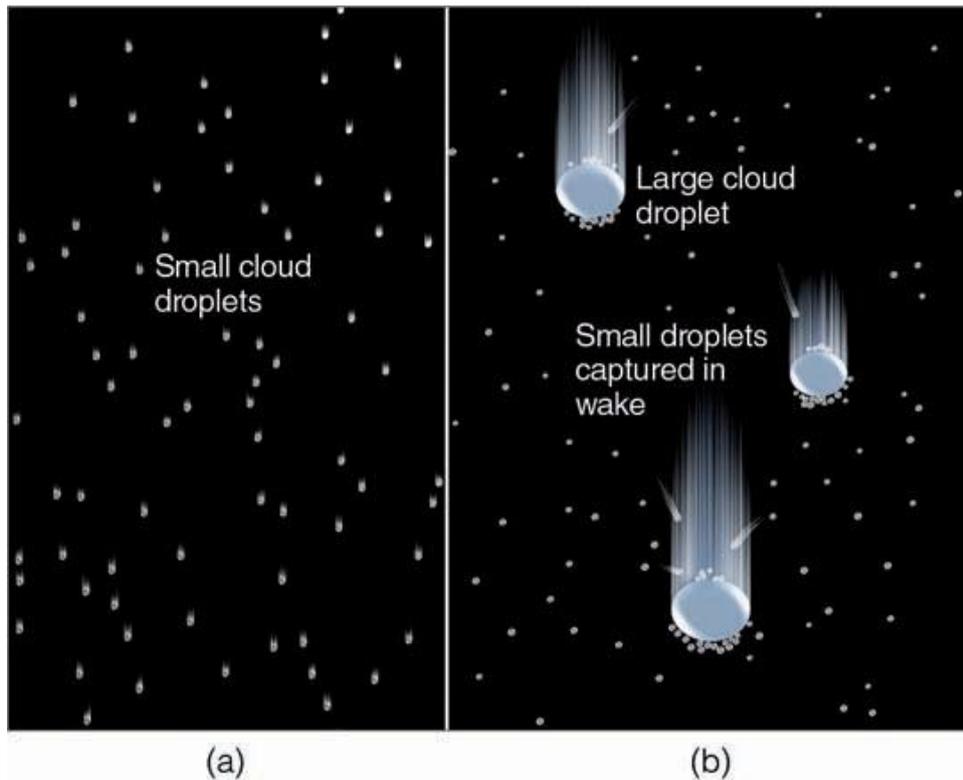


Abbildung 3: Kollision und Koaleszenz bei (a) Kleinen und (b) großen Wolkentröpfchen (Ahrens 2007, 168)

Ein weiterer Ansatz ist der Bergeron-Findeisen-Prozess. Diesem zufolge bildet die aus Eiskristallen bestehende oberste Wolkenschicht den Ausgangspunkt für die Regenbildung.

In der Atmosphäre findet der Gefrierprozess, genau wie der Kondensationsprozess, aber nur statt, wenn ein Gefrier- oder Kondensationskern vorhanden ist.

Bei den Gefrierkernen handelt es sich zumeist um in der Luft vorhandene Aerosole. Am besten sind jene geeignet, die von ihrer Oberflächenstruktur her Eis ähneln.

Die Bildung von Eiskristallen in der Atmosphäre setzt jedoch nicht ein, solange die Temperatur des Wassers noch bei 0°C liegt. Das Gefrieren des Wassers ereignet sich meist erst bei Temperaturen um die -10°C , es können sogar noch flüssige Tröpfchen bis -35°C nachgewiesen werden. Die Bezeichnung für Wasser, welches trotz Werten unterhalb des

Gefrierpunktes noch flüssig ist, lautet „unterkühltes Wasser“. In der Regel kommt in einem cm^3 nur ein Gefrierkern(/keim) vor. Sie sind in der Atmosphäre somit seltener zu finden, als Kondensationskerne(/keim) (Häckel 2016, 126). Allgemein unterscheidet sich die Anzahl der Keime nach dem Charakter und der Herkunft der Luftmassen. So sind in kontinentaler, staubiger Luft rund 100-1000 Eiskeime pro m^3 enthalten. In maritimer Luft sind hingegen nur 10-100 pro m^3 vorzufinden. Dies führt dazu, dass sich in kontinentalen Wolken viele kleine Tröpfchen bilden, und in maritimen Wolken weniger Wolkentropfen vorhanden sind, dafür aber größere (Klose 2008, 117).

Hat sich aber ein Eiskristall gebildet, entsteht, auf Grund des niedrigeren Sättigungsdampfdruckes über Eis, ein Wasserdampfstrom von den Wolkentropfen zu dem Kristall. Ab einem gewissen Zeitpunkt beginnt das Eiskristall, wegen seines zunehmenden Gewichtes, abwärts zu fallen, wobei sich sein Wachstumsprozess weiterhin fortsetzt.

Nachdem das nun entstandene Eiskügelchen durch die 0°C -Grenze gefallen ist, schmilzt es wieder und trifft in Form eines flüssigen Niederschlags auf der Erdoberfläche auf (Häckel 2016, 126f.).

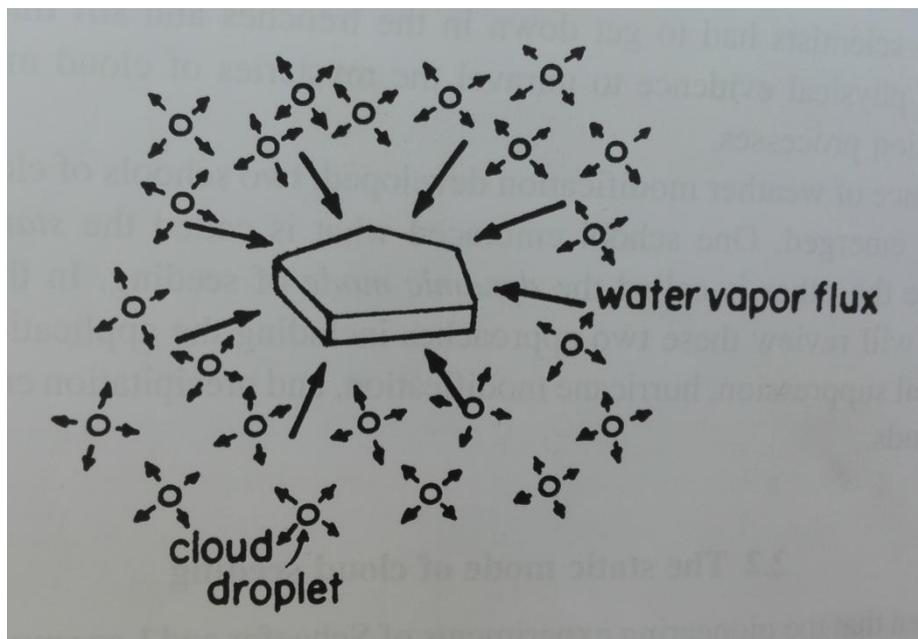


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Bergeron-Findeisen Prozesses (Cotton & Pielke 2007, 10)

Sind nun Wolken am Himmel sichtbar, aber es ereignet sich trotzdem kein Niederschlag, kann dies daran liegen, dass es an dem Vorhandensein von Kondensations- oder Gefrierkernen mangelt, die es Wolkentropfen ermöglichen sich zu Regentropfen sammeln können.

Betrachtet man nun die hier beschriebenen Prozesse, welche bei der Bildung von Niederschlag ablaufen, lässt sich einfach zusammengefasst sagen, dass Cloud Seeding daraus besteht, künstliche Aerosole in eine Wolke einzubringen, um die Bildung von Regentropfen zu fördern.

2.2.Geschichte des Cloud Seedings

Betrachtet man die Entwicklung der modernen Wettermodifikation erweisen sich die USA als Vorreiter, sowohl in der Forschung, als auch bei der Anwendung, weshalb sich dieser kurze geschichtliche Überblick vor allem auf die dortige Historie des Cloud Seedings konzentrieren wird.

Die moderne Geschichte der Wettermodifikation lässt sich grob in drei Phasen aufteilen.

Die erste Epoche der Wettermodifikation begann im frühen 19 Jh.. Hierbei verfolgte man den Plan durch große Flächenbrände oder das Abfeuern von großkalibrigen Geschützen und Raketen Niederschläge auszulösen oder Unwetter zu verhindern. Diese Ansätze stützten sich auf die Beobachtung, dass in den Tagen nach großen Artilleriegefechten häufig Regenschauer niedergingen.

Damals haben Kritiker jedoch bemängelt, dass Artilleriegefechte immer auf Gutwetter Perioden gelegt wurden, weshalb es wahrscheinlich war, dass hierauf wieder eine Schlechtwetter Phase folgen würde. Die Zusammenhänge waren somit nicht eindeutig nachvollziehbar.

Die Idee für die Auslösung von Niederschlägen durch Flächenbrände wurde als erstes von James Espy (1785-1860) vorgebracht. Der geplante Feldversuch im Jahr 1839 wurde aber nicht durchgeführt. Es dauerte noch rund 115 Jahre bis entsprechende Versuche in Frankreich und Afrika stattfanden. Die ersten Versuche zur Wolkenmodifikation wurden in den 1940er Jahren durchgeführt, welche zum einen das Ende der ersten Phase markieren und den Beginn der zweiten Phase einleiten (Caviezel & Revermann 2014, 49f.).

Die bahnbrechende Entdeckung, durch die die moderne Wissenschaft der Wetter Modifikation begann, wurde 1946 von Vincent Schaefer errungen, welcher im General Electric Research Labor im Staate New York unter der Direktion von Irving Langmuir forschte und arbeitete.

Das Projekt an dem sie arbeiteten bestand daraus vorbeugende Maßnahmen gegen Flugzeug Vereisung zu finden.

Für die Versuchsreihen wurden künstlich unterkühlte Wolken gebildet. Dabei blies man feuchte Luft in einen Gefrierschrank, welcher mit schwarzem Samt ausgekleidet war.

Während dieser Versuche stellte man fest, dass sich teilweise bis zu Temperaturen um die -23°C keine Eiskristalle bilden konnten. Nachdem man verschiedenste Substanzen probiert hatte, bewirkte erst die Einführung von Trockeneis, dass sich in rascher Geschwindigkeit eine Vielzahl von Eiskristallen formierte.

Aufbauend auf diesem erfolgreichen Versuch begann Bernard Vonnegut, auch ein Wissenschaftler am General Electric Research Labor nach chemischen Materialien zu suchen, welche eine ähnliche Struktur aufwiesen wie Eiskristalle. Er wurde fündig und stellte insgesamt drei Substanzen fest, die von der Kristallographie her geeignet sind. Silberiodid, Bleiiodid und Antimon.

Verteilte man die chemischen Iodid Verbindungen oder das Element Antimon jedoch nur in der Kältekammer, konnte man keine Reaktion erzielen. Erst als Vonnegut den Einfall hatte die Materialien zu vaporisieren und somit Rauch erzeugte, der aus sehr kleinen Kristallen des Materials bestand, bildeten sich Eiskristalle in der Kühlkammer. Besonders effektiv war hierbei der Rauch aus vaporisiertem Silberiodid.

Das erste Mal, dass diese Methode des Einbringens künstlicher Eisnuklei außerhalb des Labors getestet wurde, war am 13. November 1946. Von einem Flugzeug aus warf Schaefer umgerechnet 1,4 kg Trockeneis auf eine unterkühlte Stratuswolke. Dies resultierte in der Bildung von Eiskristallen, welche als Schnee auf die Erdoberfläche fielen. Es erfolgte die Durchführung weiterer Versuche (Cotton & Pielke 2007, 3ff.).

Da man sich damals im Kalten Krieg befand, sah man in der Wetter Modifikation vor allem ein Mittel zur Kriegsführung. Am 28. Februar 1947 begann, Unter der Direktion eines Lenkungsausschusses, bestehend aus Vertretern der drei militärischen Zweige Amerikas, dem Signal Corps, der Navy und der Air Force, das Projekt Cirrus. Dr. Irving Langmuir und Dr. Vincent Schaefer dienten als Berater des Komitees. Ziel war „die Erforschung von Wolken Partikeln und der Wolken Modifikation“ voranzutreiben. Insgesamt besaß das Projekt eine Laufzeit von 5 Jahren und endete 1952 (Havens 1952, 15f.)

Für die Experimente flog man in verschiedenen Formationen über die Wolken, z.B. L-Formen, Rennstrecken oder Griechischen Kommas, und ließ währenddessen Trockeneis fallen. Das Ergebnis waren Löcher in den Wolken, welche die Flugmuster der Flugzeuge nachstellten. „Gesät“ wurden hierbei unterschiedliche Wolkentypen, wobei unterkühlte Stratus Wolken die stärkste Reaktion zeigten (Cotton & Pielke 2007, 5f.)

Die anfängliche Euphorie legte sich jedoch bald wieder, nachdem man feststellte, dass meistens kein konkretes Wissen über Ursache und Effekt vorhanden war. So war es schwierig festzustellen, weshalb einige Experimente erfolgreich verliefen, und andere wiederum nicht.

Einen erneuten Aufschwung erlebte die Forschung zur Wetter- und Wolkenmodifikation zur Zeit des Vietnamkriegs zwischen 1962-1972. Insgesamt wurden in diesem Zeitraum 47.000 Silberiodidgeschosse in Wolken über Vietnam, Laos und Kambodscha eingebracht. Ziel des Geheimprojekts des amerikanischen Air Weather Service (AWS) war es den Monsun zu verlängern und somit die Infrastruktur durch Überflutungen zu behindern.

1973 wurde vom US-Senat veranlasst, dass Wettermodifikation nicht mehr zu Kriegszwecken eingesetzt werden durfte. Diese Resolution wurde 1978 nochmals international von der ENMOD-Konvention („United Nations Convention on the Prohibition of Military or Any Hostile Use of Environmental Modification Techniques“) bestätigt.

Somit begann die dritte Phase der Wetter Modifikation, welche immer noch andauert. Hierbei liegt der Fokus darauf Wasserknappheit, Dürreperioden oder Stürme zu bekämpfen. Weiterhin lässt sich die Effizienz des Cloud Seeding noch nicht eindeutig durch wissenschaftliche Beweise belegen, da wesentliche Funktionsmechanismen innerhalb von Wolken noch ungeklärt sind.

Berichten des amerikanischen National Research Council (NRC) zufolge beschäftigen derzeit rund 22 Länder Forschungsprojekte zur Wettermodifikation. So unter anderem China, die USA, Russland, die VAE etc.

(Caviezel & Revermann 2014, 50ff.).

2.3.Methoden des Cloud Seeding

2.3.1. Statisches Cloud Seeding

Die Methode des Statischen Cloud Seeding beruht auf dem Bergeron-Findeisen Prozess. Hierbei werden Regentropfen im oberen Bereich der Wolke gebildet, durch die Anlagerung von Wasserdampf an Eiskristallen. Damit jedoch Eiskristalle vorhanden sind, müssen Gefrierkerne gegeben sein. Dem Prinzip des Statischen Cloud Seeding liegt die Annahme zugrunde, dass in Wolken, welche keinen Niederschlag hervorbringen, ein Defizit an Gefrierkernen vorherrscht. Der Ansatz der Methode ist es künstliche Eiskeime in die Wolken einzubringen, und dadurch die Niederschlagseffizienz des Wolkensystems zu steigern. Unter

der Niederschlagseffizienz versteht man das Verhältnis der Regenmenge, welche auf der Erdoberfläche auftrifft, zu der absoluten Menge des Wassers, welches in der Wolke vorhanden ist (Cotton & Pielke 2007, 10).

Mit Hilfe des Statischen Cloud Seeding möchte man die Mikrostruktur einer unterkühlten Wolke mittels glaziogenen Materials modifizieren (Levin 2009, 5).

Zum Einsatz kommt in den meisten Fällen Silberjodid, da es von seiner kristallinen Struktur her Eis am ähnlichsten ist und bereits ab -4°C als effektiver Gefrierkeim arbeiten kann. Kommen die Silberjodid-Kristalle in Kontakt mit unterkühltem Wasser bilden diese zusammen einen Eiskristall. Der Eiskristall wächst weiter indem sich der umgebende Wasserdampf anlagert (Ahrens 2007, 173).

Eine Weitere Möglichkeit ist die Impfung mit Trockeneis, flüssigem Propan oder flüssigem Stickstoff. Werden diese ausgebracht kühlen sie die umgebende Luft in einem solchen Ausmaß ab, dass sich spontan Eiskristalle aus dem Wasserdampf generieren (Curic & Janc 2012, 6344).

Es gibt verschiedene technische Möglichkeiten die Wolke zu impfen. Entweder vom Boden, anhand von Raketen oder Generatoren, oder durch das Einbringen des Materials vom Flugzeug aus (Cotton & Pielke 2007, 10).

Auch unterscheidet man das Cloud Seeding danach in welchem Bereich der Wolke das Material eingebracht wird. Hierbei gibt es das sogenannte Base-Seeding oder das On-Top-Seeding. Beim Base-Seeding wird der Impfstoff in den Aufwindbereich an der Unterseite der Wolke eingebracht, beim On-Top-Seeding direkt in der obersten Wolkenschicht. Beim Impfen der Wolke von oben hat man den Vorteil, dass das Seeding Material unmittelbar seine Wirkung entfalten kann. Die Durchführung der Operation ist jedoch um einiges umständlicher, riskanter und teurer. Der Pilot muss in größeren Höhen und innerhalb der Wolke arbeiten, auch benötigt man leistungsstärkere Flugzeuge. Base-Seeding besitzt zwar den Nachteil, dass der Impfstoff länger braucht um zu reagieren, da er von den Aufwinden erst in größere Höhen transportiert werden muss, dafür ist die Ausführung leichter (Gilstad 2004, 21).

Lange Zeit betrachtete man das Einbringen künstlicher Gefrierkerne als das Allheilmittel für jegliche Wetter Modifikation. Es stellte sich jedoch heraus, dass der Vorgang des Cloud Seeding um einiges komplexer war als angenommen.

Anhand von Feldversuchen hat man festgestellt, dass gewisse Rahmenbedingungen gegeben sein müssen, damit Statisches Cloud Seeding erfolgreich durchgeführt werden kann.

1. Kontinentale, kalte Wolke
2. Höchsttemperatur der Wolke zwischen -10°C bis -20°C
3. Zeitfenster ist beschränkt auf die Verfügbarkeit von unterkühltem Wasser

Durch Forschungsarbeiten gewann man die Erkenntnis, dass in unterkühlten Wolken mit einer geringen Konzentration an Kondensationskernen (Cloud condensation nuclei (CCN)) die Entstehung des Niederschlags eher anhand von Koaleszenz stattfindet.

Es bilden sich wenige, dafür aber größere Wolkentropfen. Auf ihrem Fall nach unten kollidieren sie mit anderen kleineren Wolkentropfen, weshalb in diesen Wolken Niederschlagsbildung durch den Prozess der Koaleszenz wahrscheinlicher ist. Vor allem maritim gebildete Wolken besitzen eine geringere Konzentration von CCN, als in kontinentalen Regionen gebildete Wolken. Auch beinhalten warme Wolken größere Mengen an Wasserdampf als kalte, da der Sättigungsdampfdruck der Luft exponentiell zur Temperatur wächst.

Dies zusammengefasst bedeutet, dass Wolken mit einer warmen Grundtemperatur, welche sich in maritimen Luftmassen bilden, von Natur aus ein hohes Potenzial für eine große Niederschlagseffizienz besitzen.

Kalte, kontinental gebildete Wolken besitzen hingegen kein hohes natürliches Niederschlagspotenzial. Somit ist die Möglichkeit durch Cloud Seeding den Niederschlag in diesem Fall zu verbessern wesentlich größer, obwohl die Verfügbarkeit von Wasser in kalten Wolken geringer ist, als bei warmen Wolken.

Des Weiteren ist das Vorhandensein unterkühlten Wassers wesentlich für die Durchführung der Cloud Seeding Operation. Ist dies nicht gegeben, kommt es nicht zur Bildung von Eiskristallen.

Das Zeitfenster in dem unterkühltes Wasser vorhanden ist, ist jedoch begrenzt. Speziell konvektive Wolken können durch die Aufnahme trockener Luft aus der Umgebung stark beeinflusst werden. Es kommt hierdurch zur Evaporation kleiner Wolkentröpfchen innerhalb der Wolke. Dies wiederum führt zu einer Abkühlung der Luft. Dadurch entstehen Abwinde, welche den Lebenszyklus der Wolke beenden.

Auch besteht ein Effizienzfenster bezüglich der Temperatur. In einer Wolke, welche kälter als -25°C ist, sind von Natur aus genügend Eiskristalle vorhanden. Somit hätte Seeding entweder keinen, oder sogar einen negativen Effekt, indem es den Niederschlag reduziert.

Auch ab Temperaturen wärmer als -4°C lässt die Effizienz des Impfstoffes Silberjodid nach, und das Wachstum von Eiskristallen verläuft immer langsamer. Die ideale Temperatur einer

Wolke, um geseedet zu werden, liegt dem zu Folge zwischen -10 und -25°C (Cotton & Pielke 2007, 11ff.).

2.3.2. Dynamisches Cloud Seeding

Die Methode des dynamischen Cloud Seeding baut wie das Statische Cloud Seeding darauf auf künstliche Eiskeime, in Form von Silberjodid in eine Wolke einzubringen. Jedoch ist das verfolgte Ziel hierbei wesentlich komplexer. Man möchte durch die Wolkenimpfung die vertikalen Luftbewegungen verstärken, also die Dynamik innerhalb der Wolke modifizieren. Dies würde bewirken, dass mehr Wasser durch die Wolke passieren würde, was letztendlich mehr Niederschlag erzeugt (Levin 2009, 8).

Einer der Unterschiede zur statischen Methode ist, dass mehr Material benötigt wird. Während beim statischen Cloud Seeding das Ziel ist rund 1-10 Eiskristalle pro Liter zu erzeugen, bei Temperaturen wärmer als -15°C , liegt die erwünschte Eiskristall Konzentration beim Dynamischen Cloud Seeding bei rund 100 bis 1000 Kristallen pro Liter. Hierfür wird in etwa 200-1000 g Silberjodid benötigt, welches direkt von oben in die Wolke eingebracht wird (Storch & Flöser 1999, 145).

Innerhalb einer Wolke kommt es durch das Gefrieren von Wasserdampf auf einem Eiskristall zur Abgabe von latenter Wärme, in etwa $2,83 \cdot 10^6 \text{ J/kg}$, welche die unmittelbare Umgebung des Eiskristalls erwärmt. Das Wachstum von Eiskristallen bewirkt jedoch auch, dass der Sättigungsdampfdruck der Wolke unter den Sättigungsdampfdruck von Wasser fällt. Das Ergebnis davon ist, dass Wolkentröpfchen wiederum evaporieren und dabei die abgegebene latente Wärme absorbieren. Somit erfahren Wolken erst das volle Ausmaß der latenten Wärme, sobald alle flüssigen Wassertröpfchen evaporiert sind oder sich an Eiskristalle angelagert haben. Die Luft innerhalb der Wolke wird wärmer als ihre Umgebung, dehnt sie sich aus und wird nach oben transportiert.

Nicht nur die Temperatur ist ausschlaggebend für den Aufstieg von Luftparzellen in Wolken, sondern auch die Konzentration von kondensiertem Wasser in einer Wolke, da kondensiertes Wasser negativen Auftrieb bewirkt. So können Wolken, welche wärmer als ihre Umgebung sind, auf Grund zu großer Wassermengen absinken.

Fällt nun Niederschlag aus der höheren Wolkenschicht, kann der obere Teil der Wolke höher in die Atmosphäre aufsteigen und es bildet sich ein sogenannter Wolkenturm. In der unteren

Wolkenschicht sammelt sich nun jedoch das Wasser. Evaporieren die Regentropfen, nehmen sie die latente Wärme auf, und die untere, nun kältere Wolkenschicht sinkt Richtung Erdoberfläche. Dort verteilt sich die Luft horizontal und hebt die dortige wärmere, feuchtere Luft an, und es bildet sich eine neue Cumulus Wolke. Schnell wachsende Wolken haben zumeist einen niedrigeren Luftdruck unter sich, was nicht nur das Einströmen warmer, feuchter Luft befördert, sondern auch benachbarte Cumulus Wolken anzieht (Cotton & Pielke 2007, 20ff.).

Dr. W.R. Cotton, Professor an der Colorado State University unterteilt die Durchführung des Dynamischen Cloud Seedings in aufeinander aufbauende Schritte. In die obere Wolkenschicht wird eine große Menge Silberjodid eingebracht. Dies führt zu der schnellen Bildung einer großen Menge Eiskristalle, wobei viel latente Wärme freigesetzt wird. Das erwärmte Luftpaket steigt auf, was zur Folge hat, dass sich die Wolke erhöht. Die Eiskristalle verbleiben länger in der oberen Schicht und wachsen schneller, da ihre Wachstumsrate pro Einheitsmasse größer ist und ihre Fallgeschwindigkeit niedriger ist als bei flüssigen Regentropfen mit vergleichbarer Masse. Aus diesem Grund sammelt sich eine größere Niederschlagsmenge in der oberen Wolkenschicht. Wenn sich der gesammelte Niederschlag letztendlich nach unten bewegt, unterdrückt er dabei den Auftrieb innerhalb der Wolke. Der niederschlagsbedingte Abwind kann sich auch benachbart zum Aufwind bilden, hierbei entsteht ein verstärktes Abwind-Aufwind-System. Auf dem Weg nach unten schmelzen die Eiskristalle und kühlen die umgebende Luft dabei ab, wodurch eine Intensivierung des Abwindes und des Abwehens von Luft unter dem Wolketurm bewirkt wird. Dies wiederum bestärkt die Konvergenz an der böigen Wolkenfront, was das Wachstum benachbarter Wolken stimuliert. Fusionieren die beiden angrenzenden Wolkentürme, resultiert dies auch in einem gesteigerten Niederschlag. Zwei miteinander verschmolzene Cumulus Wolken produzieren zumeist das Zehnfache an Regen, wie die beiden Wolken jeweils für sich (Cotton & Pielke 2007, 29f.).

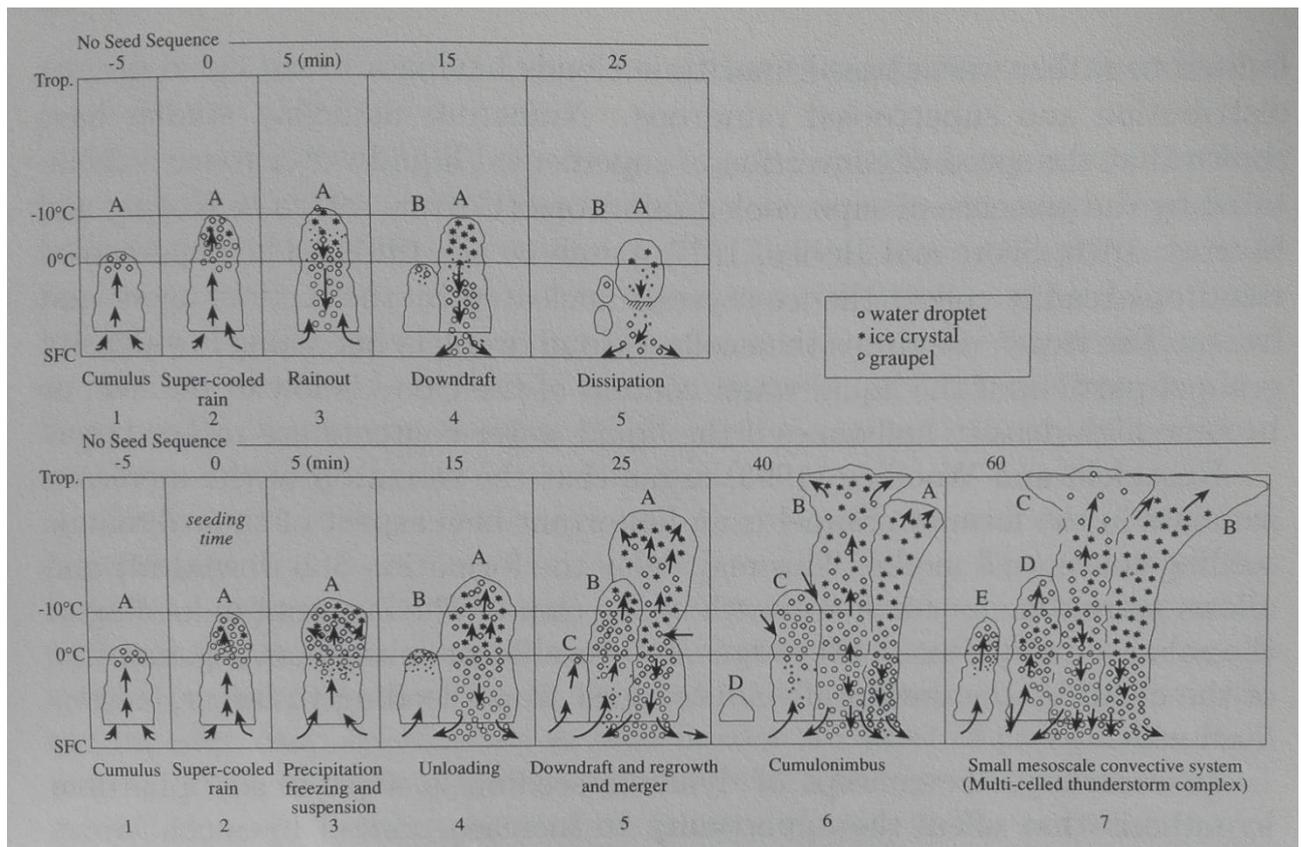


Abbildung 5: Konzeptuelles Modell des Dynamischen Cloud Seeding für Cumulus Wolken im Vergleich zu einer unmodifizierten Cumulus Wolke (Storch & Flöser 1999, 149)

Zu bedenken ist jedoch, dass es sich bei dem oben beschriebenen Ablauf um ein idealisiertes Szenario handelt.

Für die Untersuchung des Dynamischen Cloud Seeding bedient man sich meistens Simulationen an Computermodellen. Hierbei wird die Reaktion einer Wolke im geseedeten und ungeseedeten Zustand getestet. Der Höhenunterschied zwischen den beiden Varianten bezeichnet man entweder als Seeding Potential oder als Seedability.

Bei Feldversuchen in den Subtropen und Tropen (in Thailand, Westtexas und Florida) erreichte man Ergebnisse von einem Höhenwachstum von 2-3km. In kälteren Breiten, wie den Mittelbreiten, ließen sich jedoch keine Effekte beobachten.

Beobachtet wurde aber, dass ein Wachstum der Wolke nicht unmittelbar zu erhöhtem Niederschlag führt. Gründe hierfür können sein, die natürliche Variabilität der Wetterbedingungen, dass der Ansatz der Methode zu einfach ist, und nicht für alle Wolken

und Umgebungen angewandt werden kann, oder dass die Experimente nicht umfassend genug waren (Cotton & Pielke 2007, 25ff.).

Dynamisches Cloud Seeding bietet einem die Möglichkeit Niederschläge um ein Vielfaches zu erhöhen. Zwar ist die Methode eine physikalisch plausible Hypothese, jedoch ist der gesamte Prozess, der aus mehreren aufeinander aufbauenden Abläufen basiert, äußerst komplex. Fest steht, dass die physische Reaktionskette, welche für das Dynamische Cloud Seeding nötig ist bei Feldversuchen noch nicht vollständig nachgewiesen werden konnte.

Eine Voraussetzung für eine erfolgreiche Durchführung, ist vor allem ein größeres Verständnis von den Vorgängen in Cumulus Wolken (Storch & Flöser 1999, 150).

2.3.3. Hygroskopisches Cloud Seeding

Anders als die beiden vorherigen Methoden wird beim Hygroskopischen Cloud Seeding nicht versucht die Wolke durch das Einbringen künstlicher Gefrierkerne zu modifizieren, sondern über das Einbringen von Kondensationskernen. Hygroskopisches Cloud Seeding beruht somit nicht auf dem Bergeron-Findeisen Prozess.

Man muss beachten, dass sich die Versuche Niederschläge durch die Methode des Cloud Seedings zu steigern nicht nur auf unterkühlte Wolken beschränken. Gerade in den Tropischen und Subtropischen Gebieten dominieren Wolken, welche zu niedrig sind um die 0°C Grenze zu überschreiten. Wolken, welche während einer Dürreperiode zu sehen sind, besitzen warme Temperaturen. Unterkühltes Wasser ist in Ihnen nicht vorhanden (Cotton & Pielke 2007, 32).

Innerhalb warmer maritimer Wolken oder Wolken, die über einen hohen Anteil an flüssigem Wasser verfügen, ist der dominante Prozess zur Bildung von Niederschlägen die Kollision und Koaleszenz von Wolkentropfen.

Die hygroskopische Methode besteht daraus hygroskopische Partikel (Salz), wie Natrium Chlorid oder Kalium Chlorid, in eine Wolke einzubringen, um den Niederschlag zu erhöhen. Salzpartikel mit einer Größe von 5-10 µm werden injiziert. An diese lagert sich Wasserdampf ab und der entstandene Tropfen kann auf einen Durchmesser von 25 bis 30 µm anwachsen. Diese dienen für den weiteren Prozess als sogenannte „Koaleszenz Embryone“ (Storch & Flöser 1999, 151). Die durch Anlagerung entstehenden Wolkentropfen wachsen zuerst schnell dann langsam, da mit zunehmender Größe der Tropfen das Verhältnis von Oberfläche-zu-

Volumen abnimmt. So würde die Bildung eines Regentropfens nur durch Anlagerung von Wasserdampf über einen ganzen Tag dauern.

Ein weiterer Faktor, der bei der Bildung von Niederschlag in warmen Wolken beachtet werden muss, ist der Prozess der Kollision und der Koaleszenz. Hierbei gilt, je größer ein Tropfen, desto schneller fällt er und mit umso mehr kleineren Tropfen kollidiert er auf dem Weg nach unten (Cotton & Pielke 2007, 33f.).

Die hygroskopischen Partikel werden zumeist anhand von pyrotechnischen Raketen in die Wolke eingebracht. Diese Methode geht auf eine Entdeckung Mathers zurück, der feststellte, dass die Raketenflammen kleinere Salzpartikel produzierten. Die Partikel hatten nur eine Größe von 0,5 bis 10 μm und sind recht effektiv als Kondensationskeime (Mather et al. 1996, 1434).

Auch untersuchte Mather 48 modifizierte und 49 unmodifizierte Stürme in Südafrika. Er gelangte zu dem Ergebnis, dass die geseedeten Stürme nach 20 bis 30 Minuten größere Regenmassen bildeten, und dieses Regenvolumen auch für die darauf folgenden 25-30 Minuten beibehielten (Mather et al. 1996, 1444).

Eine weitere Möglichkeit beim Seeden warmer Wolken ist das Einbringen von Wassertropfen, um Niederschlag auszulösen. In den 50er Jahren führte Braham Experimente zum hygroskopischen Cloud Seeding durch, indem er rund 1250 Liter Wasser pro Kilometerstrecke von einem Flugzeug in warmen, tropischen Cumulus Wolken verteilte. Es konnte nachgewiesen werden, dass es hieraufhin zu stärkeren Niederschlägen kam, als üblich (Braham et al. 1957, 85f.). Der große Nachteil dieser Vorgehensweise ist jedoch, dass man gewaltige Wassermengen nach oben transportieren muss. Die Kosten dafür sind exorbitant, weshalb das Verfahren wirtschaftlich ineffizient ist.

Bisher ist noch nicht genau festgelegt, welche Wolken am besten geeignet sind für das Hygroskopische Cloud Seeding.

Warme, maritime Wolken sind von Natur aus gute Niederschlagslieferanten, somit besteht hier kein sonderlich großes Verbesserungspotenzial. Kalte, kontinentale Wolken hingegen, enthalten so viele kleine Tropfen, dass künstlich erzeugte große Tropfen diese nicht alle einsammeln können.

Es ist also ein Spektrum an Wolken zu finden, welches sich zwischen diesen beiden Extremen bewegt. Die Forschung sucht nach Wolken, welche genügend flüssiges Wasser enthalten um einen warmen Niederschlagsprozess zu unterstützen, der durch hygroskopisches Cloud Seeding beschleunigt werden kann (Storch & Flöser 1999, 151)

Das Hygroskopische Cloud Seeding ist zwar vielversprechend, befindet sich jedoch noch in der experimentativen Phase. Problematisch ist die belastbare Auswertung der Ergebnisse, da diese nur anhand von Radardaten erstellt werden. Es kann in dieser Hinsicht nicht nachgewiesen werden, ob Hygroskopisches Cloud Seeding auch zu einer Erhöhung des Niederschlags am Erdboden führt. Auch ist noch nicht genau bekannt welche physikalischen Prozesse durch das Einbringen des Seeding Materials ablaufen, da die Wolken häufig erst zeitverzögert reagieren. Teilweise kann eine solche Wartephase eine Zeitspanne von bis zu 6 Stunden umfassen.

Mehr Untersuchungen müssen angestrebt werden, bevor genauere Aussagen gemacht werden können (Cotton & Pielke 2007, 40).

2.4.Einsatzbereiche des Cloud Seedings

Es gibt recht unterschiedliche Einsatzbereiche für die Methode des Cloud Seedings.

Es kann eingesetzt werden zum Zweck der Hagelabwehr oder um in trockenen Gebieten den Niederschlag zu verstärken. Weitere Möglichkeiten sind die Erzeugung von Schneefällen, um die Schneesverhältnisse in Skigebieten zu sichern, oder Schlechtwetterfronten aufzulösen, um optimales Wetter für gesellschaftliche Großveranstaltungen zu garantieren.

2.4.1. Statisches Cloud Seeding zur Hagelabwehr in Bayern

2.4.1.1.Natürliche Gegebenheiten

Geographisch liegt Bayern in der warm-gemäßigten Klimazone im Übergangsbereich des maritimen Klimas Westeuropas zum kontinentalen Klima Osteuropas. Von Bedeutung für das Klima Bayerns sind auch seine unterschiedlichen Höhenzonen. So nehmen die Berge durch ihre Luv- und Leeeffekte Einfluss auf die Entwicklung der Temperatur, der Bewölkung und der Niederschläge der Region (STMUV 2015, 33). Die Hügellandschaften des Alpenvorlandes und die Alpen begünstigen die Bildung hochragender Gewitterwolken mit

starken Turbulenzen und damit geht auch ein größeres Hagelrisiko einher.

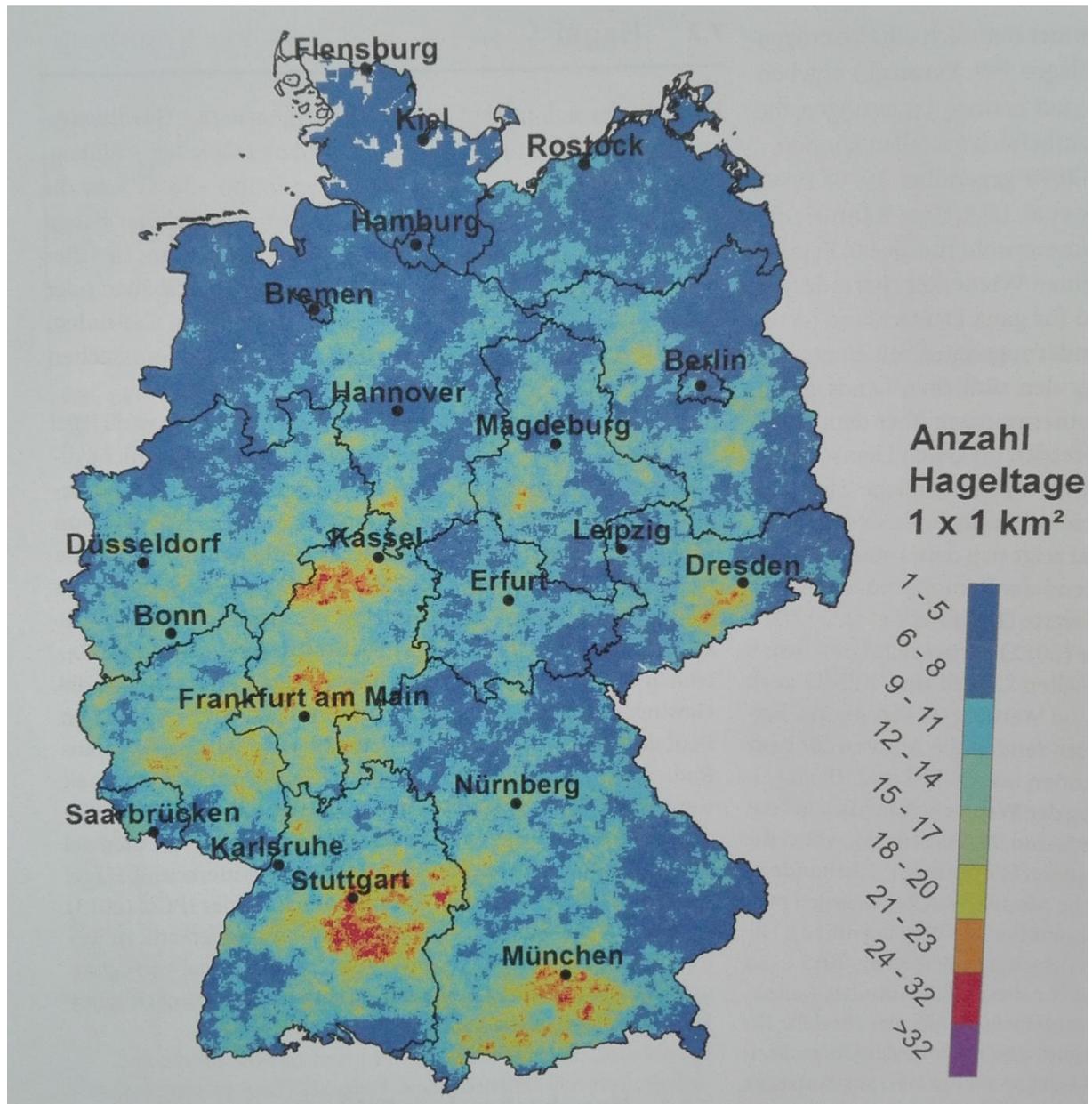


Abbildung 6: Hagelhäufigkeit innerhalb Deutschlands (Kunz et al. 2017, 62)

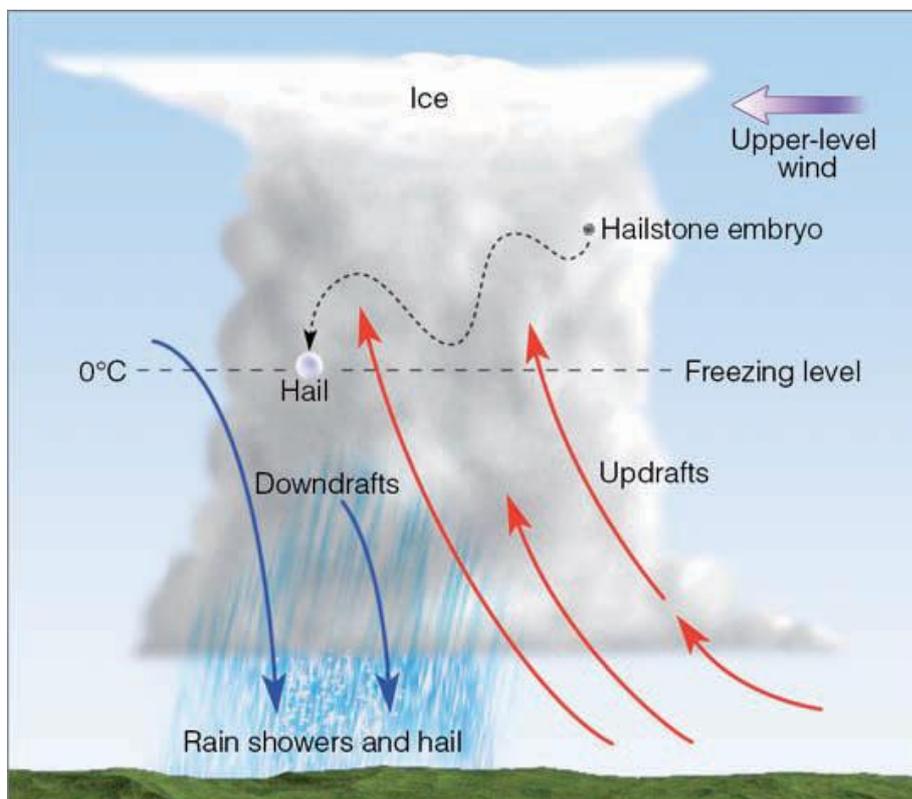
Innerhalb des Alpenvorlandes treten Hagelstürme am häufigsten zwischen den Monaten Mai und August auf. Es ist aber auch möglich, dass sich dieses Zeitfenster auf Grund von entsprechenden Wetterlagen ausdehnt, oder sich um mehrere Wochen verschiebt (Vogl 2018 a, Anhang 1).

Die Hagelbildung findet in Cumulonimbuswolken statt. Da diese über extrem viel unterkühltes Wasser verfügen, steht eine sehr große Wassermenge einer sehr kleinen Anzahl von Eiskristallen gegenüber. Folglich wachsen die Eiskristalle unverhältnismäßig schnell. Um aber Hagelkörner zu erhalten, die die Größe eines Golfballs haben, benötigt man für ein

Hagelkorn eine Milliarde Wolkentröpfchen. Auch muss das Korn 5-10 Minuten in der Wolke verbleiben, damit es eine solche Größe erreicht (Ahrens 2007, 185).

Dabei ist von Vorteil, dass Cumulonimbuswolken sehr instabil sind, durch die, auf Grund des Wasserreichtums, freigesetzte Kondensationsenergie. Wegen dieser Instabilität kommt es an der Vorderseite der Wolke zu starken senkrechten Aufwinden. Beginnt nun der sich bildende Eispartikel, in Folge seines zunehmenden Gewichts, nach unten zu fallen, gerät er in die Aufwinde, und wird wieder nach oben transportiert. Während der gesamten Zeit läuft der Wachstumsprozess des Eispartikels weiter. Schneidet man ein Hagelkorn auf, kann man erkennen, dass dieses schalenförmig aufgebaut ist. Innerhalb des Hagelkorns wechseln sich Schichten mit klarem und trübem Eis ab. Dies ist zurückzuführen auf die unterschiedliche Schnelligkeit bei der Ablagerung von Wasserdampf. Die klaren Schichten haben sich in tieferen, wärmeren und wasserdampfreicheren Wolkenschichten gebildet, wohingegen die diffusen Schichten in sehr kalten, und somit sehr hohen Wolkenschichten entstanden sind.

Die Turbulenzen ermöglichen es dem Hagelkorn länger in der Wolke zu bleiben und immer weiter zu wachsen, bis es irgendwann so schwer ist, dass es doch durch die Aufwinde fällt. Die entstandene Eiskugel ist jedoch so groß, dass sie nach dem Durchfallen der 0°C Grenze keine Zeit mehr hat bis zum Auftreffen auf die Erdoberfläche komplett aufzuschmelzen (Häckel 2016, 135 ff.)



2.4.1.2. Schäden durch Hagelstürme

Hagelstürme kommen regelmäßig im Alpenvorland vor und können Schäden in Millionen-, wenn nicht sogar in Milliardenhöhe verursachen.

Durch Hagelschläge kommt es nicht nur zu hohen Verlusten in der Landwirtschaft, sondern auch zu schweren Sachschäden an Häusern, Kraftfahrzeugen etc. Beispielsweise können allein die Kfz-Versicherer im Naturgefahrenreport der GDV (Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V.) nur für das Jahr 2015 eine Schadensbilanz von insgesamt 325.000 durch Hagel und Sturm zerstörte oder beschädigte Fahrzeuge verzeichnen. Insgesamt betrug die Höhe der Schäden 650 Mio. Euro. Hierbei handelt es sich jedoch, gemäß dem Schadensreport, um ein recht durchschnittliches Jahr. Das verheerendste Hagelunwetter innerhalb Deutschlands wurde am 12. Juli 1984 in München verzeichnet (GDV 2016, 37-39). Kommt es meistens nur sehr kleinräumig zu Hagelschlägen innerhalb von Wärmegewittern, kann sich teilweise auch Hagel in Kaltfronten bilden. Dieser Hagelstrich erstreckt sich meistens über eine Länge von mehreren hundert Kilometern (Steininger et al. 2005, 16). So war das Unwetter damals ca. 250 km lang und 5-15 km breit. Innerhalb von 20 Minuten ereignete sich ein heftiger Hagelniederschlag, mit Hagelkörnern, die zum Teil einen Durchmesser von bis zu 10 cm hatten. Insbesondere der zentrale und der südliche Teil Münchens wurden dabei schwer getroffen. Der Schaden belief sich auf rund 70.000 Wohngebäude, 1.000 Gewerbebetriebe, 150 Flugzeuge, mehr als 200.000 Kraftfahrzeuge und 20.000 ha landwirtschaftliche Nutzfläche, die durch den Hagelsturm beschädigt wurden. Auch wurden ca. 400 Personen so schwer verletzt, dass sie ärztlich behandelt werden mussten (Kurz 1986, 5). Die Kosten der Schäden beliefen sich insgesamt auf 3 Mrd. DM, umgerechnet rund 1,5 Mrd. Euro (Steininger et al. 2005, 16).

Versicherungszahlen liefern jedoch nur ein unvollständiges Bild der gesamten Hagelschäden, da nur die Schäden angegeben sind, die auch versichert waren. Die entstandenen Defekte können in der Hinsicht um einiges höher sein (Vogl 2018 b, Anhang 2).



Abbildung 8: Hagelkorn >9cm 1984 München (Sävert, T.)

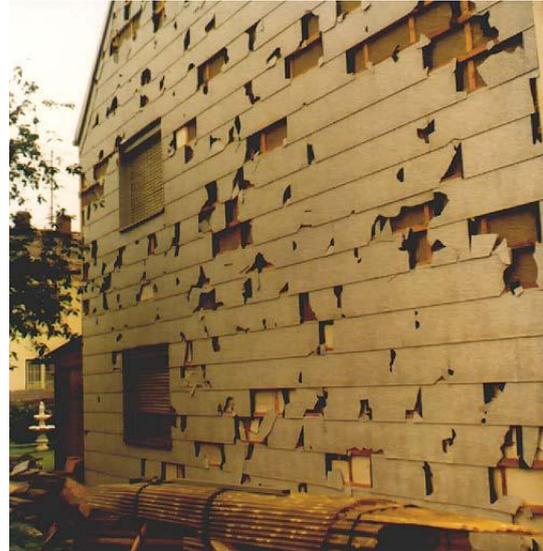


Abbildung 9: Beschädigtes Haus nach dem Münchner Hagelunwetter 1984 (Wagner, M. 2001)

2.4.1.3. Geschichte der Hagelabwehr in Bayern

Um Unwetter und Hagelstürme abzuwehren bediente man sich früher dem sogenannten Wetterläuten. Bei aufziehendem Gewitter wurden die Kirchenglocken geläutet, um Gott um Hilfe zu bitten, und Dämonen und Hexen abzuwehren. (Schmitt-Lermann 1984, 172). Einer anderen abergläubischen Praktik zu Folge, würde das Vergraben von Korallen im Feld Hagelschäden verhindern können.

Ab der Neuzeit begann man auch mit dem sogenannten „Wetterschießen“. So gibt es Berichte über Experimente in Wasserburg im Jahre 1675, bei denen man versucht durch Artilleriefuer schlechtes Wetter wegzuschießen. Durch das Schießen erhoffte man, dass sich die Luft in starke Bewegung versetzen, und sich daraufhin die Wolke zu zerteilen würden. Während des 18 Jh. wurde Hagelschießen innerhalb Bayern mit großer Regelmäßigkeit durchgeführt, bis 1792 ein Verbot ausgesprochen wurde, was jedoch erfolglos blieb (Schmitt-Lermann 1984, 183ff.).

Ende des 19 Jh. ließ das wissenschaftliche Interesse nach. Erst 1929 wurden wieder Versuche in Rosenheim aufgenommen (Schmitt-Lermann 1984, 194). Hierbei wurden einfache Hagelraketen vom Boden aus in die Wolken geschossen, und impften diese mit Silberjodid (Hagelabwehr Rosenheim 2018a). 1933 wurde diese Praxis jedoch in Deutschland vollständig verboten.

Interesse kam in Bayern erst 1953 wieder auf, nachdem ein Hagelunwetter im Landkreis Rosenheim schwere Schäden verursacht hatte. Der damalige Landrat Georg Knott schlug vor, den Landkreis Rosenheim zum Versuchsbezirk für wissenschaftliche Experimente der Hagelabwehr zu machen, und 1958 erfolgten die ersten praktischen Versuche. Anfangs wurden nur durch Bodengeneratoren und Raketen Silberjodid in die Wolken eingebracht (Schmitt-Lermann 1984, 194f.). Während dieser ersten 10-jährigen Freilandversuchsreihe waren rund 140 Hagelschützen, 30 Betreuer der Bodengeneratoren und über 200 Wetterbeobachter im Einsatz (Hagelabwehr Rosenheim 2018a). Die Heißluftgeneratoren am Boden waren aber nur wirksam bei geeigneter Thermik und Bewölkungsverhältnissen. Auch wurden viele der Generatoren im Laufe der Zeit funktionsuntüchtig. Bezüglich der Raketen bekam man ab den 70ern Beschaffungsschwierigkeiten, und wegen Änderungen des Sprengstoffgesetzes konnten die Treibsätze für die Generatoren nicht mehr gelagert werden. Auf Grund all dieser Probleme stellte man 1975 auf Flugzeuge um. Anfangs flog nur eine einzige Maschine über die Landkreise Rosenheim, Miesbach und Traunstein (Schmitt-Lermann 1984, 195). 1982 erhielt die Hagelabwehr 2 neue zweimotorige Flugzeuge des Typs Partenavia PN 68. Die beiden Flugzeuge D-GITY und D-GOGO sind bis heute noch immer im Einsatz. 1994 wurde der „Verein zur Erforschung der Wirksamkeit der Hagelbekämpfung im Raum Rosenheim e.V.“ gegründet. Mittlerweile umfasste der Verein rund 8.000 Mitglieder. Die Mitgliedsbeiträge und freiwillige Spenden gehen in die Erhaltung des aktuellen Stands der Hagelabwehr und in die Forschung. (Hagelabwehr Rosenheim 2018a).

Insgesamt umfasst das derzeitige Einsatzgebiet der Rosenheimer Hagelabwehr eine Fläche von 4.800 km². Dazu gehören die Stadt und der Landkreis Rosenheim und die Landkreise Miesbach und Traunstein. Seit 2000 werden auch 18 angrenzende Gemeinden der Bezirke Kufstein und Kitzbühel befliegen. Ausgangspunkt aller Einsätze der Hagelflieger ist der Flugplatz in Vogtareuth (Hagelabwehr Rosenheim 2018b).

Die Kosten für das Projekt beliefen sich relativ stabil innerhalb der letzten paar Jahre auf 230.000€. Dies beinhaltet den Betrieb beider Flugzeuge, den Kauf der Silberjodid-Lösung und alle erforderlichen Wartungen und Versicherungen. Finanziert wird die Hagelabwehr Rosenheim überwiegend durch den Landkreis Rosenheim, doch auch die Landkreise Miesbach und Traunstein, die kreisfreie Stadt Rosenheim und Gemeinden aus Kitzbühel und Kufstein leisten einen finanziellen Beitrag (Vogl 2018b, Anhang 2)

Auch werden 25% der Flugeinsatzkosten vom Verein für Hagelforschung übernommen (Vogl 2018a, Anhang 1).



Abbildung 10: Einsatzgebiete der Hagelabwehr Rosenheim, orange markiert (Hagelabwehr Rosenheim b)

2.4.1.4. Durchführung einer Hagelabwehr Operation

Das Prinzip der Hagelabwehr durch Cloud Seeding ist es Gewitterzellen mit künstlichen Eiskeimen anzureichern. Durch die Erhöhung der Eiskeimkonzentration steht für jeden Gefrierkern nun weniger Wasser zur Verfügung, das sich anlagern könnte. Die Eiskeime können somit nicht so stark wachsen. Statt einiger großer Eiskristalle entstehen nun viele kleine, die auf dem Weg nach unten zur Erdoberfläche wieder schmelzen. Dies bezeichnet man als das Wettbewerbsprinzip.

Die Ausbringung künstlicher Eiskristalle hat aber noch einen anderen Effekt. Frühzeitiger Niederschlag kann dadurch bewirkt werden. Somit entzieht man der Wolke Wasser, welches

ihr dann nicht mehr für das Hagelwachstum zur Verfügung steht (Höller & Meischner 1993, 71).

Die Strategien bei der Befliegung der Unwetterwolken sind abhängig vom gegebenen Gewittertyp. In Einzellengewitter verläuft der Prozess der Hagelbildung zeitlich linear. Geimpft wird hierbei durch kreisförmige Flugbahnen der Maschine unter dem konvektiven Zentrum des Gewitterturms.

Bei Multizellen bildet sich der Hagel in den neu entstehenden Gewitterzellen. In diesem Fall versucht man die neuen Gewitterzellen in der Wachstumsphase zu impfen.

Innerhalb von Superzellen ereignen sich gleichzeitig alle Hagelbildungsphasen an verschiedenen Orten in der Zelle. Geimpft werden diese Zellen an ihrer Vorderseite im Aufwindbereich (Pachatz 2005, 23).

Im Landkreis Rosenheim wird die Wolkenimpfung vom Flugzeug aus betrieben. Generatoren sind an den Tragflächen angebracht und mit einer Silberjodid-Aceton Lösung gefüllt. Die Hagelabwehr Rosenheim verwendet hierfür eine 6% Lösung. Enthalten sind 5% Silberjodid und 1% Zusatzstoffe, dabei handelt es sich um gewöhnliche Salze. Ausgebracht wird das Silberjodid im Aufwindbereich der Gewitterwolke. Hierbei wird die Flüssigkeit in den Generatoren bei knapp unter 1000°C verbrannt.

Die dabei freigesetzten Rauchpartikel werden durch den Aufwind nach oben transportiert und dienen in den höheren Wolkenschichten als Gefrierkeime. Insgesamt werden 400-600 Liter der Lösung innerhalb eines Jahres verbraucht.

Bei einem Einsatz werden immer beide Flugzeuge gestartet, um möglichst viel Material in kurzer Zeit in die Wolken einzubringen. Jede Maschine besitzt zwei Generatoren, die jeweils 20l fassen können. Insgesamt kann man somit rund 80l ausbringen. Dies entspricht, bei einer 6% Lösung rund einem Pfund reinem Silberjodid. Der Impfstoff kann in weniger als zwei Stunden vollständig verbrannt werden, lässt sich aber auch auf bis zu 3 ½ Stunden strecken.

Während des Flugeinsatzes werden die Piloten vom Boden aus mit aktuellen Radardaten versorgt, damit das Aufwindfeld möglichst schnell gefunden wird. Vieles ist aber von der Erfahrung und dem eigenen Ermessen des Piloten abhängig.

Man kann davon ausgehen, dass die Hagelabwehr Rosenheim pro Jahr durchschnittlich 15-20 Einsatztage hat (Vogl 2018b, Anhang 2).



Abbildung 11: Flugzeug GITY der Hagelabwehr Rosenheim (Nickl, T.)

2.4.1.5. Aktuelle Entwicklungen

In Zusammenarbeit der FH-Rosenheim und der Hagelabwehr Rosenheim ist eine App mit dem Namen RO-BERTA, kurz für „**RO**senheims meteorologische **BE**sonderheiten: Eine **Re**gelungs-**Te**chnische-**Au**fgabe“, entwickelt worden. Seit dem Jahr 2013 wird dieses Projekt praktisch umgesetzt. Ziel ist es die Einsätze der Hagelflieger durch das Verarbeiten und Weiterleiten von Bodenradarmessungen des Deutschen Wetterdienstes zu unterstützen. Dies soll dabei helfen das Silberjodid zum Impfen der Wolken präziser auszubringen.

Auch kann sich die Bevölkerung durch das Herunterladen der App über aktuelle Flüge informieren, und diese in Live-Bildern mitverfolgen. Während des Flugs werden gleichzeitig weitere meteorologische Messdaten gesammelt (Zentgraf 2012, 2).

Die Zusammenarbeit zwischen der FH-Rosenheim und der Hagelabwehr besteht immer noch. So ist bereits RO-BERTA 2 abgeschlossen und RO-BERTA 3 steht zur Diskussion.

2.4.1.6. Zunahme der Hagelschläge

Hagelschläge sind sehr kleinräumige Wetterereignisse, weshalb sich nur durch indirekte Beobachtungen Aussagen über die Hagelklimatologie machen lassen. Mit Hilfe dieser indirekten Daten lässt sich die tatsächliche Hagelhäufigkeit jedoch nicht bestimmen. Sie geben lediglich Auskunft über das atmosphärische Potenzial für die Entstehung von Gewittern und Hagel. Auf Grund dieser Problematik bei der Beobachtung ist es schwierig von den

Alternativen zur Hagelabwehr durch Cloud Seeding, wären, beispielsweise in der Landwirtschaft die Abdeckung von Feldern mit Planen. Diese Praxis ist jedoch mit einem hohen finanziellen und arbeitstechnischen Aufwand verbunden. Auch kann durch die Einführung von Folienkulturen das Landschaftsbild negativ verändert werden.

2.4.2. Hygroscopisches Cloud Seeding zur Wassergewinnung in den VAE

2.4.2.1. Natürliche Gegebenheiten



Abbildung 13: Karte der Vereinigten Arabischen Emirate (OnTheWorldMaps)

Die Vereinigten Arabischen Emirate (VAE) sind ein Zusammenschluss der sieben Emirate Abu Dhabi, Dubai, Sharja, Ajman, Umm al-Qaiwain, Ras al-Khaimah und Fujairah. Die

föderale Erbmonarchie liegt an der Südostspitze der Arabischen Halbinsel und umfasst 82.880 km².

Das Land besteht zum Großteil aus unfruchtbarer Wüste. Die Sandwüste bedeckt gut 90% des westlichen Landesteils. Die Höhe der Sanddünen nimmt zum Landesinneren hin zu und kann bis zu 250 m erreichen. Im Osten geht die Sandwüste in das al-Hajar-Gebirge über. Dieses erstreckt sich gut 150km von Norden nach Süden und 50km von Westen nach Osten. Die Höchste Erhebung ist der Jabal Yibir mit 1527m (NCAR 2005, 2f.)

Die VAE sind ein äußerst arides Land. Der Jahresniederschlag variiert von 60 mm in der Liwa-Oase im Südwesten bis zu 160 mm in den Bergen im Norden und Nordosten des Landes. Das dortige Hajar-Gebirge zwingt die Luftmassen zum Aufsteigen und bewirkt somit konvektive Niederschläge. Ein Großteil der Niederschläge ereignet sich während der Wintermonate von Dezember bis März. Jedoch kann es auch im Sommer und Frühjahr zu heftigen konvektiven Regenfällen in den Bergen an der omanischen Grenze kommen (Al-Nuaimi & Murad 2007, 207). Die Atmosphäre über dem Land ist grundsätzlich sehr trocken, nur aus dem Nordwesten im Winter und durch das östliche Monsun-System im Sommer wird feuchte Luft in die Region transportiert. Die Höhe der Niederschläge fällt aber von Jahr zu Jahr sehr variabel aus (NCAR 2005, 84). Auf Grund des geringen und seltenen Niederschlags verfügen die VAE auch nicht über Flüsse, sondern weisen die für Wüstengebiete typischen Wadis auf.

Das Klima der VAE ist nicht nur sehr aride, sondern auch durch sehr hohe Temperaturen geprägt. Während der kühleren Wintermonate betragen die Temperaturen zwischen 18 und 23°C, innerhalb der Sommermonate können zum Teil die 50°C überschritten werden. Das jährliche Evaporationspotential beläuft sich auf rund 2000 mm (Al-Nuaimi & Murad 2007, 207).

Ein großes, natürliches Aquifer über das die VAE teilweise verfügt, ist das Umm er Radhuma-Dammam Aquifer. Das Aquifer erstreckt sich auch über die Staaten Saudi Arabien, Jemen und Oman.

Im südlichen Bereich des Aquifers sind bisher die VAE und der Oman die einzigen Nationen, die Wasser fördern. Der Oman 45 Mio. m³ und die VAE 7,7 Mio. m³ pro Jahr. Diese Wasserreserven haben sich vor gut 20.000 bis 10.000 Jahren gebildet und besitzen nur eine sehr geringe Erneuerbarkeit, zwischen 0-20mm/Jahr (UN-ESCWA & BGR).

Innerhalb der VAE befindet sich das Umm er Radhuma-Dammam Aquifer im Süden des Landes und liegt größtenteils nur im Emirat Abu Dhabi. In den anderen Regionen ist

Grundwasser in den flachen quartären Ablagerungen in den Küstenebenen enthalten. Diese werden indirekt durch Wadihochwässer aus den östlichen Bergen aufgefüllt (Pike 1983, 124). Die natürlichen Wasseraquifere enthalten nur 3% frisches Wasser. Von den restlichen Grundwasseranteilen ist 33% leicht brackiges, und 64% brackiges bis salziges Wasser (Gonzalez et al. 2016, 2).

2.4.2.2. Wasserversorgung der VAE

Wasserknappheit in den Regionen des Nahen und Mittleren Ostens stellt ein großes Problem dar.

Innerhalb der letzten paar Jahrzehnte ist, auf Grund der Entdeckung von Erdöl, die Wirtschaft, und somit auch die Bevölkerung der VAE explosionsartig gewachsen. Um dem rapide ansteigendem Bedarf an Wasser nachzukommen, wurden die natürlichen Aquifere des Landes stark in Anspruch genommen (Al-Nuaimi & Murad 2007, 208).

Aktuell beziehen die VAE ihr Wasser aus drei verschiedenen Quellen.

51% des Wassers stammt aus Grundwasserquellen. Dieses Wasser wird hauptsächlich zur Bewässerung in der Landwirtschaft verwendet (Gonzalez et al. 2016, 2). Zum Grundwasser zählt man auch durch Dämme gespeichertes Regenwasser (AlAwar 2014, 2). Wasser aus Entsalzungsanlagen macht gut 37% der Wasserversorgung aus und wird zu gut 96% nur für die Versorgung von Haushalten gebraucht. Die restlichen 12% sind recyceltes Wasser, das ausschließlich zur Landschaftsbewässerung dient. Der Wasserverbrauch pro Kopf liegt in den VAE bei 500 l/Tag und ist einer der höchsten weltweit (Gonzalez et al. 2016, 2). Insgesamt liegt der komplette Wasserverbrauch des Landes pro Tag bei 4.18 Mio. m³

Trotzdem nur eine geringe Fläche des landwirtschaftlich nutzbar ist, wird rund 60% des gesamten Wassers für die Agrarwirtschaft gebraucht. Häuslicher Wasserkonsum beansprucht 25% des Wasserbedarfs, die Industrie 9% und Landschaftsbau 6% (AlAwar 2014, 2).

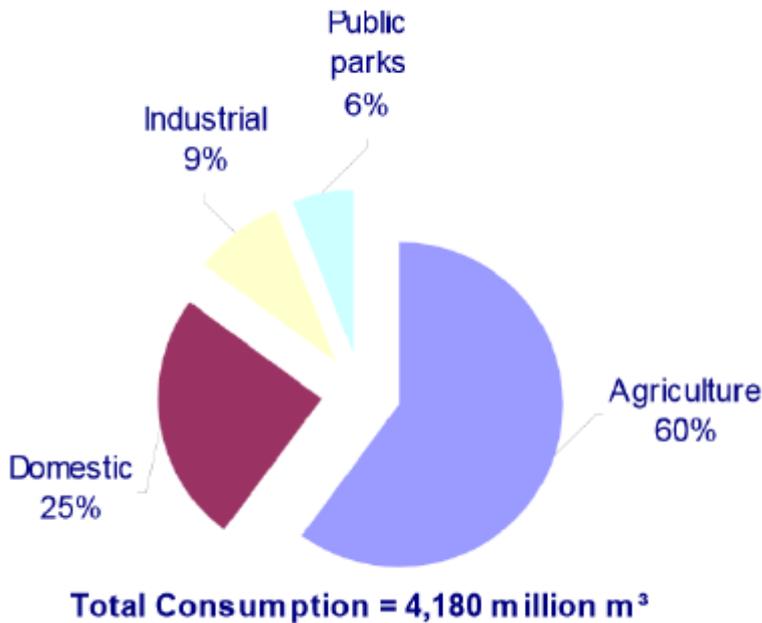


Abbildung 14: Wasserverbrauch in den VAE (Al Awar 2014, 2)

Wie bereits oben erwähnt, ist die Trinkwasserversorgung der VAE stark abhängig von Wasser aus Entsalzungsanlagen. Insgesamt verfügt das Land über rund 70 Anlagen, die eine Gesamtleistung von 1.700 Mio. m³ haben. Diese liegen meistens an der Küste oder auf Inseln. Es gibt sie aber auch im Inland, um brackisches Grundwasser aufzubereiten (Gonzalez et al. 2016, 2). Geschätzt 90% des trinkbaren Wassers in den VAE wird mittels Entsalzung gewonnen. Diese Methode ist jedoch sehr energieintensiv, und damit auch recht kostspielig. Insgesamt belaufen sich die Kosten für die Desalinations Anlagen auf ca. 11 Mrd. Dirham pro Jahr (Taylor-Evans & Coyne 2013, 132). Dies entspricht derzeit in etwa 2,5 Mrd. €. Um die Anlagen zu betreiben werden zumeist nicht erneuerbare Energieressourcen, wie Erdgas verwendet.

Eine Maßnahme, welche von den VAE zur Sicherstellung der Wasserversorgung getroffen wurde, ist der Bau zahlreicherer Dämme innerhalb des Landes. Insgesamt beläuft sich die Anzahl auf 130, all diese Dämme zusammengenommen, besitzen ein Fassungsvermögen von 120 Mio. m³ (AlAwar 2014, 4). Die meisten Dämme befinden sich im Osten und Norden des Landes. Die ersten drei Dämme wurden bereits im Jahr 1982 errichtet. Mit Hilfe dieser Bauten wird abfließendes Oberflächenwasser nach Regenfällen aufgefangen und gespeichert (Al-Nuaimi & Murad 2007, 208).



Abbildung 15: Hatta Damm (Eigene Aufnahme 2015)

2.4.2.3. Geschichte des Cloud Seedings in den VAE

1982 wurde der erste Cloud Seeding Feldversuch im Emirat Abu Dhabi durchgeführt. Die Impfung der Wolke erfolgte vom Flugzeug aus und der hierbei verwendete Impfstoff war Silberjodid.

Ab 2000 schlossen sich die VAE im Bezug auf ihre Forschungsarbeiten mit anderen weltweit anerkannten Forschungsorganisationen zusammen, dem National Center of Atmospheric Research (NCAR), der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) aus den Vereinigten Staaten und der Witwatersand Universität aus Südafrika. Auch kam es zur Zusammenarbeit mit der World Meteorological Organisation (WMO) (Al Rifai 2018).

2001 starteten die VAE in Zusammenarbeit mit der Witwatersand Universität und dem Südafrikanischen Wetterdienst eine Projektreihe, die von 2001 bis 2005 dauerte.

In der ersten Phase führte man meteorologische Studien durch, um Wolken und Niederschlagscharakteristika der Region zu identifizieren. Ziel war es herauszufinden, ob überhaupt in den VAE geeignete Wolken für Regenmodifikation gegeben sind. Man erlangte die Erkenntnis, dass die in den Wintermonaten gebildeten Wolken, sich als ungeeignet für das Cloud Seeding erwiesen. Während der Sommermonate bilden sich jedoch konvektive, warme Wolken über dem Hajar Gebirge an der Grenze zum Oman, die durchaus Potenzial haben.

In Phase zwei wurden randomisierte Cloud Seeding Operationen durchgeführt, um die Effizienz der Methode zu erfassen. Anschließend wurde, basierend auf den Ergebnissen von Phase zwei ein potientiell Programm zur Vorgehensweise bei der Regenmodifikation entwickelt (NCAR 2005, 7).

Im Jahr 2015 riefen die VAE das Forschungsprogramm für Rain Enhancement Science ins Leben. Ziel war und ist es die Technologie zur Erhöhung des Niederschlags zu verbessern. Hierfür arbeitet man mit internationalen Forschungsteams zusammen, und unterstützt diese finanziell.

Das Forschungsprogramm ist Teil der Innovationsstrategie, die am 19 Oktober 2014 von Sheikh Mohammad Bin Rashid Al Maktoum, dem Vizepräsidenten und Premierminister der VAE und Herrscher Dubais, ins Leben gerufen wurde. Ziel ist die VAE innerhalb von nur sieben Jahren, also bis 2021, zu einem der innovativsten Nationen weltweit zu machen. Hierbei setzt man sich mit sieben verschiedenen Themenfeldern auseinander: Erneuerbarer Energie, Transport, Bildung, Gesundheit, Technologie, Wasser und Raumfahrt (UAE Government).

Das Programm zur Erforschung des Rain Enhancement wird von dem Nationalen Center für Meteorologie und Seismologie (NCMA) geleitet.

Man möchte Fortschritte bei der Wissenschaft, der Technik und der Anwendung der künstlichen Erzeugung von Niederschlag erzielen, und damit den allgemeinen Regenfall in den VAE und anderen ariden und semiariden Regionen erhöhen.

Das Programm verfügt über ein Budget von 5 Mio. US \$ und vergibt jährlich bis zu fünf Auszeichnungen für ausgewählte Forschungsprojekte, die das Potenzial haben neue Erkenntnisse auf dem Forschungsfeld des Cloud Seeding zu finden. Dieser Zuschuss wird auf die nominierten Forschungsprojekte aufgeteilt, die nach einem zweistufigen Überprüfungs- und Bewertungsprozess ausgewählt wurden. Bewerben können sich heimische, ausländische, öffentliche oder private Organisationen, sowie in Sonderfällen auch Einzelpersonen (UAEREPc).

Nominiert für die Gelder wurden bisher neun Forscher aus Japan, Russland, China, Finnland, Großbritannien, Deutschland und den USA (UAEREPb).

2.4.2.4. Durchführung des Cloud Seedings

Wurde anfangs noch Silberjodid verwendet, stellte man nachher auf natürliche Salze um, wie Kalium Chlorid oder Natrium Chlorid.

Die Durchführung der Einsätze konzentriert sich vor allem auf den bergigen Nord-Osten des Landes in dem sich Cumulus Wolken im Sommer sammeln. Wichtig ist bei der Durchführung der Cloud Seeding Operationen Regionen anzufliegen, in denen es am wahrscheinlichsten ist, dass durch das Regenwasser Grundwasserreserven wieder aufgefüllt werden (Giwa & Dindi 2017, 730).

Zum Einsatz kommen „Fackeln“, welche an der Unterseite der Flugzeugschwingen befestigt sind. Diese haben eine Brenndauer von 2-3 Minuten. Dabei wird viel hygroskopisches Material in die Wolken eingetragen und benötigt ca. 20 Minuten um seine Wirkung zu entfalten (siehe Abb. 17).



Abbildung 16: Fackeln an der Unterseite von Tragflächen (Bardsley 2018)

Durch das Verbrennen der darin enthaltenen Materialien entstehen feine Salzpartikel. Die künstlich erzeugten Kondensationskerne sind größer, als die bereits vorhandenen natürlichen Aerosole. Die kleineren, natürlichen werden somit durch die größeren, künstlichen Kondensationskeime gehemmt, da sich der Wasserdampf eher an den größeren Kernen ablagert. Dadurch bilden sich weniger Kondensationskeime zu Wolkentropfen heraus.

Wie bereits beschrieben, ist somit ein breiteres Spektrum an Tröpfchengrößen in der unteren Wolkenschicht gegeben und die Wolkentropfen können durch Kollision und Koaleszenz schneller anwachsen. Innerhalb einer modifizierten Wolke werden rund 15 min benötigt damit ein Regentropfen entstehen kann, die normale Dauer in einer Cumulus Wolke würde 30 min in Anspruch nehmen (NCAR 2005, 343)

Eine erfolgreiche Durchführung des Rain Enhancement ist abhängig von der Hygroskopizität, der Größe und der Konzentration der künstlichen Kondensationskerne.

Wichtig hierbei ist, dass die künstlich erzeugten Kondensationskerne größer sind als die vorhandenen natürlichen. Am effektivsten für das Wachstum von Regentropfen sind Partikel die über einen Radius verfügen, der größer als $10\mu\text{m}$ ist.

Die schnellste Bildung von Niederschlag findet statt wenn man Partikel mit einem Radius $>15\mu\text{m}$ einsetzt. Von Nachteil kann aber sein, dass der Regen zu früh einsetzt ohne dass sich das Seeding Material auf die ganze Wolke auswirken kann. Partikel, welche jedoch zwischen $1-10\mu\text{m}$ liegen, haben den Vorteil, dass sie die Konzentration von Nieselregentropfen erhöhen. Da diese Tropfen kleiner sind, erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, dass das Seeding Material länger in der Wolke verbleibt und sich der Seeding Effekt auf die gesamte Wolke oder sogar angrenzende Wolken ausbreitet.

Es ist festzuhalten, dass die optimale Größe der eingesetzten Partikel zwischen $0,5$ bis $6\mu\text{m}$ liegen soll, um eine möglichst hohe Effizienz zu erzielen (NCAR 2005, 350f.)

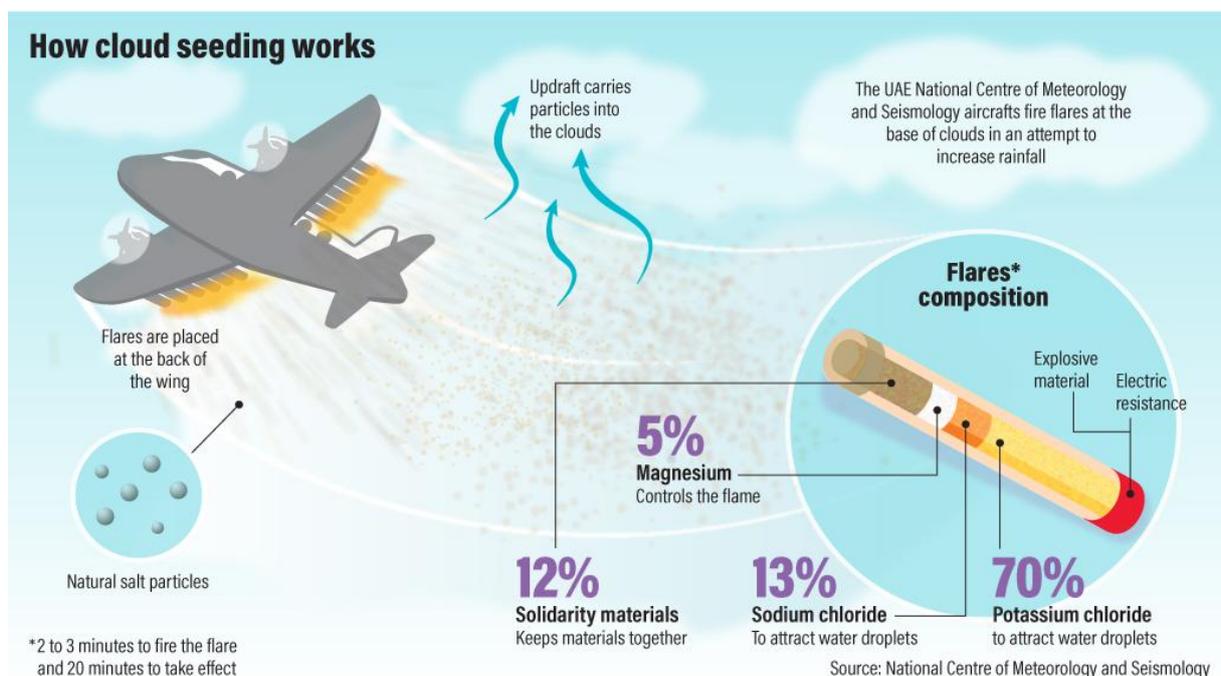


Abbildung 17: Durchführung einer Hygroskopischen Cloud Seeding Operation (Dennehy, J. 2018)

2.4.2.5. Aktuelle Entwicklung des Cloud Seedings in den VAE

Als eine Nation, die in einem äußerst ariden Landschaftsraum liegt und über eine schnell wachsende Wirtschaft und Bevölkerung verfügt, ist eines der Hauptziele der VAE die Sicherstellung der Wasserversorgung.

Derzeit verfügt das Programm der VAE über 60 Wetterstationen, ein Wetterradarnetz und sechs Flugzeuge.

Weiterhin gibt es jedoch noch Aspekte, die man bezüglich des Cloud Seedings verbessern möchte. So will man den Prozess der Wetterdatensammlung weiterentwickeln, zum einen möchte man die Geschwindigkeit erhöhen, zum anderen geographischen Erfassung des Landes vervollständigen.

Auch sollen weitere Untersuchungen durchgeführt werden bezüglich der Effizienz des eingesetzten Materials. Obwohl man davon ausgehen kann, dass Salz die beste Option ist für warme, konvektive Wolken, möchte man weitere Nachforschungen anstellen, um herauszufinden wie das Material noch besser ausgebracht werden kann um eine maximale Wirkung zu erzielen. Letztendlich steht noch die Verbesserung der Überwachungsstruktur an, welche Echtzeit Informationen liefern kann, um geeignete Wolken für Modifikations Operationen zu finden (UAEREPa).

2.4.2.6. Entwicklung der Wasserversorgung in den VAE

Bezüglich des Klimawandels kann man davon ausgehen, dass, mit dem Anstieg der Temperaturen, Extremereignisse und somit Ökosystemstörungen, wie langanhaltende Dürren oder Hitzewellen zunehmen werden (IPCC 2014, 50). Diese Tendenz wird die bereits komplizierte Wasserversorgung der VAE nochmals erschweren.

Eine stabile Wasserversorgung zu erreichen hat jedoch auch unabhängig vom Klimawandel äußerste Priorität für den Wüstenstaat.

So geht man davon aus, dass sich bis 2030 der Wasserbedarf um 30% steigern wird, auf Grund der wachsenden Bevölkerung.

Bereits heute überschreitet die Wasserentnahme aus den natürlichen Aquiferen die Erneuerbarkeit dieser um das 15fache. Prognosen gehen davon aus, dass die Grundwasserressourcen innerhalb von 55 Jahren vollständig aufgebraucht sein werden, falls die Wasserentnahme weiterhin so verläuft wie bisher (Taylor-Evans & Coyne 2013, 131).

Des Weiteren ist die Stabilisierung der Wasserversorgung auch eine Frage der Nationalen Sicherheit. Im Falle einer Krisensituation, wenn beispielsweise die gesamten Desalinationsanlagen ausfallen würden, würde die Grundwasserreserven und das, mit Hilfe von Dämmen, gespeicherte Wasser, den Wasserbedarf der VAE nur für einen Tag decken können.

Prognosen besagen jedoch, dass das Cloud Seeding Programm bis 2030 soweit entwickelt sein wird, dass im Jahr 2030 20% der Aquifere anhand von Cloud Seeding aufgefüllt werden können (Giwa & Dindi 2017, 730).

3. Potenzialanalyse – Kritikpunkte des Cloud Seedings

3.1. Nachweisbarkeit der Effizienz

In der Wissenschaft herrscht Uneinigkeit darüber, ob mit der Methode des Cloud Seedings das Wetter nachweisbar beeinflusst werden kann.

Bei der Durchführung von Laborexperimenten zum Cloud Seeding konnte immer eine Wirksamkeit nachgewiesen werden. Bei der Ausbringung der Impfstoffe, wie beispielsweise Silberjodid, in der freien Natur fielen die Ergebnisse jedoch häufig recht unterschiedlich aus. Innerhalb eines abgeschlossenen Labors sind die Rahmenbedingungen für die Versuche ständig gleichbleibend. Bei Feldversuchen hingegen spielen vielfältige andere Komponenten eine bedeutsame Rolle für die erfolgreiche Durchführung des Cloud Seedings. So sind die Rahmenbedingungen durch variierende Aufwindgeschwindigkeiten und unterschiedliche Landschaftsformen bestimmt, welche Einfluss auf die Wolkenhöhe nehmen. Eine Wolke stellt keinen Gegenstand dar, sondern nur einen Zustand, der sich in konstanter Veränderung befindet. Während sich die Wolke an der einen Seite neu bildet, löst sie sich auf der anderen Seite bereits wieder auf.

Da sich die Bedingungen innerhalb einer Wolke in einem ständigen Wandel befinden, fällt es schwer die Ergebnisse von verschiedenen Versuchen miteinander zu vergleichen. Auch ist schwer nachzuweisen inwieweit sich das Wettergeschehen durch den Einsatz von Seeding Material geändert hat. Ist eine Wolke einmal geseedet lässt sich im Nachhinein nicht feststellen, wie viel Niederschlag es gegeben hätte falls die Wolke nicht geimpft worden wäre. Den Versuchen fehlt in der Hinsicht die statistische Strenge (Cotton & Pielke 2007, 17ff.).

Feldversuche des Cloud Seeding werden meistens als randomisierte Versuche durchgeführt. Hierbei fliegt der Pilot, ohne zu wissen, was er in seinen Brennbehältern mit sich trägt. Dies kann entweder der regulär verwendete Impfstoff sein oder ein Placebo Material.

Bei der Messung und Datenanalyse von Cloud Seeding Experimenten verwendet man meistens Satellitenbilder, Niederschlagsmessungen am Boden und vor allem Radardaten.

Das Wetterradar ist ein wichtiges Instrument für die Ergebnismessung des Cloud Seeding.

Mit Hilfe des Wetterradars kann man die Richtung und Geschwindigkeit der Teilchen innerhalb der Wolken messen und auch zwischen flüssigen und festen „Hydrometeoren“ unterscheiden (Pachatz 2005, 83ff.). Man kann untersuchen, ob sich die Eispartikel-Anzahl in der Wolke erhöht oder ob es nun ein breiteres Spektrum an Wolkentröpfchen-Größen in den geseedeten Wolken gibt (Cotton & Pielke 2007, 69). Trotzdem sind diese Radardaten mit Vorsicht zu behandeln. In der geseedeten Wolke kann es teilweise zu Reaktionen kommen, welche auch auf den Radar nachzuweisen sind. Der künstlich modifizierte Niederschlag muss aber nicht zwangsläufig an der Erdoberfläche ankommen, sondern kann bereits auf dem Weg nach unten verdunsten. Somit war die Operation den Radardaten nach zwar erfolgreich, das Ergebnis kommt jedoch nicht auf dem Erdboden an (Pachatz 2005, 150). Wichtig ist es in der Hinsicht auch den Niederschlag, Hagel oder Schneefall, je nachdem welches Wetterphänomen beeinflusst werden soll, auf der Erdoberfläche zu dokumentieren.

Die Effizienz der Methode wissenschaftlich zu verifizieren gestaltet sich trotzdem als äußerst schwierig. Um dies zu verdeutlichen wird Pachatz „Analyse der Effizienz der Hagelabwehr in der Steiermark anhand von Fallbeispielen“ betrachtet. . Ziel war es die Effizienz der Hagelabwehr durch das Ausbringen von Silberjodid nachzuweisen. Hierfür wurde versucht sogenannte „Zwillingsfälle“ bei Wolken zu finden. Wolken die von ihrer Entstehung und Dynamik her ähnlich sind. Die eine Wolke sollte beimpft werden, die andere nicht. (Pachatz 2005, v).

Der Effekt des Seeding wurde sowohl anhand von Radar- und Satellitendaten, als auch durch Bodenmessungen dokumentiert.

Die Messungen am Boden wurden mit Hilfe von Testplatten durchgeführt. Dabei ist die Hagelmessstation wie folgt aufgebaut. Fünf Platten verdichteter Styroporschaum werden in 1,5 m Höhe montiert. Vier Platten sind vertikal nach den Windrichtungen N, S, W und O angebracht, die fünfte Platte, die Deckplatte wird horizontal, oberhalb der anderen Platten befestigt.

Nach einem Hagelschlag wertet man die Anzahl und den Einfallswinkel der Hagelgeschoss-Abdrücke im Styropor aus. Auch versucht man das Hagelkornspektrum, Anzahl der

Hagelkörner geordnet nach der Größe, und die kinetische Energie der Körner zum Zeitpunkt ihres Auftreffens festzustellen. Anhand der Energie des Aufschlags lässt sich der Schaden für die Landwirtschaft abschätzen (Syabik 2004, 5).

Die Auswertung der Versuchsreihe, welche von 1991 bis 2001 lief, kam zu mehreren Ergebnissen. Zum einen hat die Anzahl der kleinen Hagelkörner zugenommen, während die Anzahl der großen zurückgegangen ist. Dies ist ein Hinweis auf die Wirksamkeit der Hagelabwehr. Auch ist die Zahl der Hageltage weniger geworden, dies kann aber auch andere meteorologische Ursachen haben und muss nicht zwangsläufig mit der Hagelabwehr zusammenhängen. Des Weiteren sind weniger Hageltestplatten(HTP)-Stationen getroffen worden, was darauf schließen lässt, dass die Hagelunwetter räumlich enger vorkommen.

Die Heftigkeit der Gewitter hat jedoch zugenommen, da die Energiewerte für Hagelkörner zuletzt gestiegen sind (Pachatz 2005, 106).

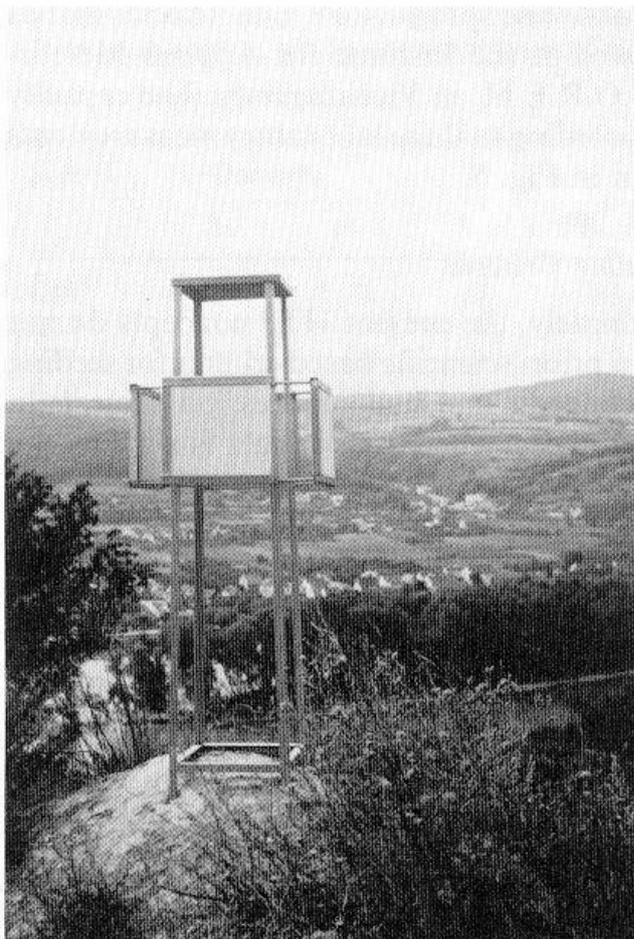


Abbildung 18: Hageltestplattenstation (Pachatz 2005, 100)

Innerhalb des Untersuchungszeitraums dokumentierte man alle Hagel- und Gewitterereignisse in der Steiermark, musste aber feststellen, dass die sogenannten „Zwillingsfälle“ bei Wolken nicht existieren.

Letztendlich fand man drei Fälle die für die Untersuchung geeignet waren. Die Hagelereignisse unterschieden sich anhand des Vorhandenseins von Radarhagel, Bodenhagel und Seeding.

Tabelle 1: Gegenüberstellung aller drei Fallbeispiele nach Vorhandensein von Radarhagel, Bodenhagel und Seeding (Pachatz 2005, 115)

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

Bei Fall 1 kam es, trotz eines durchaus gelungenen Einsatzes der Hagelabwehr mit planmäßiger Ausbringung des Silberjodids, zu Hagelschlägen am Boden. Untersuchungen der HTP-Stationen haben ergeben, dass die Auftreffenergie der Hagelkörner auf den Testplatten relativ gering war. Ein Nachweis für eine gewisse Wirksamkeit des Impfstoffes ist dies aber nicht. Die Verteilung des Silberjodids innerhalb von Wolken ist weder genau vorhersehbar noch nachvollziehbar.

Für Fall 2 wurde auch eine Seeding Operation durchgeführt. Hierbei blieb der Bodenhagel aus, man kann jedoch nicht zu 100% davon ausgehen, dass dies auf die Ausbringung von AgJ zurückzuführen ist.

Bei Fall 3 kam es weder zu Bodenhagelmeldungen noch zu Seedingeinsätzen. Zwar wurde eindeutig Radarhagel gemessen, am Boden wurde jedoch kein Auftreffen von Hagelkörnern verzeichnet. Gerade dieser letzte Fall verdeutlicht die Ungenauigkeit der Messtechnik anhand von Radarbildern, da auf diesen Hagelkörner und Regen nicht zuverlässig unterschieden werden kann (Pachatz 2005, 149).

Das oben genannte Beispiel verdeutlicht einige der Probleme, welche bei der Nachweisbarkeit von Cloud Seeding auftreten. Zum einen ist es nicht möglich die Effizienz anhand von Einzelfällen nachzuweisen. Erforderlich wären hierfür langjährige randomisierte Untersuchungsreihen mit beimpften und unbeimpften Gebieten (Pachatz 2005, 152).

Des Weiteren ist es nötig die gesamte hypothetische Reaktionskette, die in einer Wolke nach der Induktion des Impfmaterials abläuft, vollständig nachzuweisen. Diese physikalischen Auswirkungen des Cloud Seeding konnten bisher noch nicht genau nachvollzogen werden. Auch ist es nötig Prozesse in ungeseedeten Wolken und Gewittern genauer zu untersuchen (Cotton & Pielke 2007, 71).

3.2. Auswirkungen auf die Umwelt

3.2.1. Rückstände des Cloud Seeding Materials

Wettermodifikation in Form von Cloud Seeding wird bereits seit über 50 Jahren betrieben. Fraglich ist, ob die eingesetzten Materialien negative Auswirkungen auf die Umwelt haben können.

Verschiedenste Materialien werden als Impfstoffe für das Cloud Seeding eingesetzt.

Voraussetzung ist, dass sie entweder von ihrer kristallinen Struktur her einem Eiskristall ähnlich sind, oder, dass sie hygroskopische Eigenschaften besitzen und sich Wasserdampf gerne an die Partikel anlagert.

3.2.1.1. Silberjodid

Für kalte Wolken die flüssiges unterkühltes Wasser enthalten, verwendet man Materialien, wie Trockeneis (CO_2), flüssige Stickstoff (N_2), flüssiges Propan, Silberjodid (AgI) oder Bleijodid (PbI_2) (Curic & Janc 2012, 6344).

Da jedoch Silberjodid, das weltweit, am häufigsten, verwendete Material ist, läuft die Frage nach der Verträglichkeit der eingesetzten Materialien meistens darauf hinaus, inwieweit Silberjodid Auswirkungen auf die Umwelt hat.

Verwendet wird eine Lösung aus Silberjodid und Aceton. Auf Grund seiner Lichtempfindlichkeit zerfällt AgI ca. eine halbe Stunde nachdem es ausgebracht wurde in seine Bestandteile Silber und Jod, wegen der UV-Strahlung (Pachatz 2005, 32f).

Das gesamte, in die Wolken eingebrachte Material, wird mit dem einsetzenden Niederschlag wieder nach unten transportiert und in den Boden und die Gewässer eingebracht.

Wichtig für die Umweltverträglichkeit ist hierbei die Löslichkeit des Silbersalzes und die daraus resultierende Verfügbarkeit von freien Silber Ionen. Studien haben ergeben, dass bei Tieren, die regelmäßig dem Einfluss von Silber Ionen ausgesetzt sind, Blutarmut, ein

Vergrößertes Herz, Wachstumsverzögerungen und degenerative Änderungen der Leber auftreten. Bei Menschen kann es zu Irritationen des Mast-Darms kommen, zu Lungenentzündungen, Nierenläsionen und einer leichten Argyrie (Blaufärbung der Haut). Exposition zu höheren Silberkonzentrationen führt zu schweren Dünndarmdurchfällen, vergrößerten Herzen, schwerer Argyrie und in extremen Fällen zum Tod, auf Grund von Atemwegsbeschwerden (Curic & Janc 2012, 6345).

Damit es zu diesen Reaktionen kommt, müsste man aber über einen sehr langen Zeitraum extrem hohen Konzentrationen von freien Silber Ionen ausgesetzt sein müssen.

Äußerst empfindlich reagieren aquatische Pflanzen und Lebewesen auf den Eintrag von geringen Mengen an Silber Ionen. Kann man für sensitive Landpflanzen erst ab 7,5 mg Ag/kg Boden negative Auswirkungen verzeichnen, reagieren Wasserpflanzen bereits ab Konzentrationen zwischen 3,3 bis 8,2 µg/l mit vermindertem Wachstum und sterben ab Mengen >130 µg/l ab. Liegen freie Silber Ionen in einer Konzentration von 0,01-1,0 mg/l vor, haben sie fungizide, algizide und bakterizide Eigenschaften. Diese Menge ist für den Menschen ungefährlich, weshalb Silber Ionen auch in der Trinkwasseraufbereitung eingesetzt werden.

Die Verfügbarkeit freier Silber Ionen ist jedoch sehr abhängig von der chemischen Verbindung in der es vorliegt und deren Löslichkeit. So ist Silberiodid in Wasser so gut wie unlöslich und somit ein sehr schlechter Distributor von Silber Ionen. Selbst wenn sich die Verbindung AgJ, auf Grund der UV-Strahlung auflöst, geht das gelöste Silber auf der Erdoberfläche schnell wieder neue Verbindungen ein. So verbindet sich Silber mit Chlorid Ionen, Carbonat Ionen, Sulfid Ionen und aufgelöstem organischen Karbonat. Diese Elemente sind von Natur aus in Gewässern enthalten. Die Anzahl der freien Silber Ionen bleibt somit sehr gering (William & Denholm 2009, 76f.).

Bezüglich der Ablagerung von Silberjodid im Boden, gibt es eine Studie von S.E. Tsiouris und seinem Team aus dem Jahr 2002. Diese untersuchten den Silbergehalt von Ackerböden in Griechenland, über denen seit mehreren Jahren Cloud Seeding betrieben wurde. Zum Vergleich untersuchte man auch nicht betroffene Flächen. Die beiden von Cloud Seeding betroffenen Untersuchungsgebiete waren jeweils 200.000 ha und 100.000ha groß. Über ersterem hatte man im Laufe der Zeit insgesamt 469 kg AgJ, über letzteren 361 kg AgJ ausgebracht. Die Forschungsergebnisse zeigten, dass die Silberkonzentration der behandelten Böden zwischen 37.2 bis 44.5 µg /kg und bei den unbehandelten Böden zwischen 6.7 bis 30.4 µg /kg lag. Diese geringfügige Erhöhung der Silberjodid Konzentration innerhalb der

betroffenen Böden hat aber voraussichtlich nur minimale Auswirkungen auf die dortige Umwelt (Tsiouris et al. 2002, 700).

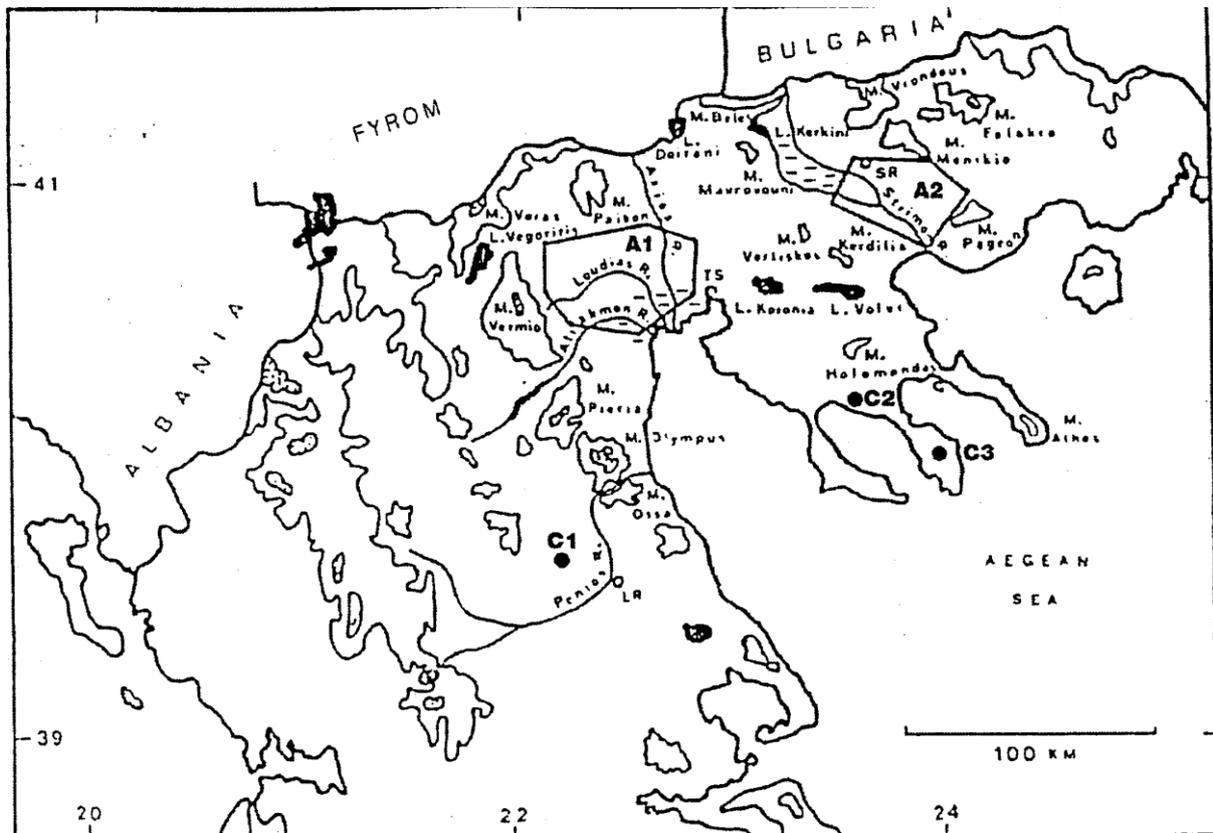


Abbildung 19: Lage der landwirtschaftlichen Regionen, welche betroffen sind vom Cloud Seeding A1 und A2 und den Kontrollregionen C1, C2, C3 (Tsiouris et al. 2002, 699)

Bisher waren die durch Cloud Seeding nachgewiesenen Silber Konzentrationen zu gering um nachhaltige Schäden in der Umwelt zu verursachen. Trotzdem ist zu bedenken, dass ein regelmäßiges Ausbringen von Silberjodid über die Jahre zu einer Kumulation des Materials auf den betroffenen Flächen führen kann. Folgeschäden können eventuell die Veränderung des mikrobielle Boden-Ökosystem sein (Fajardo et al. 2016, 434).

Um die Konzentration von Silberjodid nach einem Cloud Seeding Einsatz zu bestimmen, berechnet man häufig einen Durchschnittswert von der Menge des eingesetzten AgJ durch die Flächengröße des geseedeten Aerials. Das räumliche Verteilungsmuster des ausgebrachten Silberjodids ist aber um einiges komplexer. Denn mit dem Niederschlag ausgewaschenes Silberjodid kann aus der geseedeten Region ausgeschwemmt werden. So können Silberjodid Residuen auch mehrere hunderte Kilometer vom Einsatzgebiet entfernt nachgewiesen werden (Curic & Janc 2012, 6347).

3.2.1.2.Lösliche Hygroskopische Materialien

Bei warmen Wolken oder Nebel werden hygroskopische Materialien, wie Natrium Chlorid (NaCl), Kaliumchlorid (KCl), Urea (Harnstoff) oder Ammoniumchlorid verwendet (Curcic & Janc 2012, 644f.).

Messungen des Deutschen Wetterdienstes über Jahrzehnte hinweg haben gezeigt, dass im Niederschlag bereits viele der Elemente von Natur aus enthalten sind, aus denen sich die verwendeten Salze zusammensetzen.

So können im normalen Regen bereits Natrium- und Kalium-Ionen, Ammonium und Chlorid-Ionen gemessen werden. Diese werden durch die Aufwirbelung von Staub am Erdboden in die höheren Schichten der Atmosphäre getragen und gelangen somit in die Wolken (DWD).

Beim Cloud Seeding kommt häufig ganz normales Kochsalz (NaCl) zum Einsatz, es ist nicht bekannt, dass dieses Material toxische Eigenschaften hätte, ökologisch ist es somit unbedenklich.

Bei Cloud Seeding Operationen ist die nachgewiesene Salzkonzentration des Niederschlags nicht größer als 5 mg/l. Die Beeinflussung der Natur ist in dieser Hinsicht minimal und auch eine angebliche Versalzung des Einsatzgebietes kann ausgeschlossen werden (Belyaeva et al. 2011, 160).

3.2.1.3.Unlösliche Hygroskopische Materialien

Weitere Materialien sind puderartige Reagenzien. Verwendet werden beispielsweise weiße Tonerde, Kupferoxide oder Sand. Die besten Eigenschaften, um als Kondensationskern zu dienen, besitzt Bauzement, der aus natürlichen Aluminiumoxiden und 4% Gips besteht. Seine Partikel-Größe liegt bei 5 µm. Somit kann die optimale Dispersion des Puders von 3000 cm²/g erreicht werden. Darunter versteht man die Gesamtoberfläche aller Partikel pro Gewichtseinheit.

Mithilfe der Ausbringung von Zementpuder möchte man die Bildung und das Wachstum konvektiver Wolken unterdrücken, um schlechtes Wetter zu verhindern. Die Impfung der Wolke mit den künstlichen Aerosolen befördert die Bildung von Niederschlag und dieser verstärkt wiederum die Abwinde. Als Folge dessen erhofft man sich, dass sich das Wachstum der Wolke einstellt und die Wolke zerfällt. Ungefähr 5kg Zement benötigt man für eine 1km hohe konvektive Wolke. Für eine einzelne Cumulus oder Cumulonimbus Wolke benötigt man bereits 25-30 kg Zement (Korneev et al. 2016, 479).

Im Bezug auf die Verträglichkeit für die Umwelt geht man davon aus, dass ähnlich wie bei den löslichen hygroskopischen Materialien hierbei keine ökologischen Risiken besteht.

Das Ausbringen von Zementpulver kann jedoch auch andere unerwartete Gefahren bergen. So kam es im Juni 2008 zu einem Zwischenfall in Russland bei dem ein 25kg Sack Zement in ein Haus einer Vorstadt Moskaus einschlug. Verletzt wurde niemand. Bei einem regulären Cloud Seeding Einsatz der Russischen Luftabwehr, um schönes Wetter für die Feiertage zu garantieren, wurde der Zement ausgebracht. Doch anstatt sich in der Luft komplett zu pulverisieren, behielt er seine Form bei und schlug mit voller Wucht am Erdboden auf. Dies ist bisher der einzige verzeichnete Zwischenfall (Reuters 2008).

3.2.2. Ausbleiben der Regenfälle in angrenzenden Gebieten

Kritisch zu betrachten ist bei der Praxis des Cloud Seedings auch, ob die Methode Auswirkungen auf angrenzende Gebiete haben könnte.

Eine weitverbreitete Befürchtung ist, dass die künstliche Erhöhung des Regens in einer Region, den Niederschlag in den benachbarten Gebieten verringern kann. Der Einfluss des Cloud Seedings auf Gebiete, die außerhalb der Zielregion liegen, wird im Englischen auch als „Extra Area“-Effekt bezeichnet.

Es wurden bereits mehrere Untersuchungen zu dieser Vermutung durchgeführt.

So startete Solak ein Projekt zur Bestimmung der Extra Area Effekte in Zentral und Süd Utah. Hierbei bediente man sich der A-posteriori historical target/control regression Methode.

Es wurden, aufbauend auf Niederschlagswerten aus der Zeit in der noch kein Cloud Seeding betrieben wurde, Werte für heute prognostiziert, wenn man nicht die Methode des Cloud Seedings aufgegriffen hätte.

Anschließend verglich man die prognostizierten und die gemessenen Werte. Dabei stellte sich heraus, dass innerhalb des Zielgebiets eine Steigerung von 14%, und in den Gebieten mit einer Entfernung von 0-120 km zum Zielgebiet auch eine Niederschlagssteigerung von 14% und in den Regionen mit 120-140km Entfernung eine Steigerung von 5% stattgefunden hat.

Insgesamt berechnete sich ein Verhältnis zwischen den Gemessenen und den Prognostizierten Werten von 1,08, dies entspricht einer durchschnittlichen Erhöhung des Niederschlags um 8% (Siehe: Tabelle.)

Man konnte somit nachweisen, dass Cloud Seeding positive Auswirkungen auch für benachbarte Gebiete hat (Solak et al. 2003). Die A-posteriori Methode muss jedoch kritisch betrachtet werden, da sie einige Ungenauigkeiten aufweist. So werden Faktoren, wie

klimatischer Wandel oder veränderte Landnutzung nicht in die Berechnung der Prognose miteinbezogen (DeFelice et al. 2013, 194).

Tabelle 2: Ergebnisse der Abwind Messung in Utah(Solak et al. 2003, 6)

Distance From Target	No. of Sites	Ratio Obs/Pred	Precip. Diff. (in.)	Correlation (r)
Target	27	1.14	1.39"	0.97
0-25 miles	6	1.12	0.35"	0.90
25-50 miles	1	1.42	0.49"	0.59
50-75 miles	1	1.19	0.32"	0.82
75-100 miles	2	1.16	0.35"	0.75
100-125 miles	4	1.06	0.25"	0.88
125-150 miles	3	0.98	-0.09"	0.83

Eine weitere Untersuchung wurde von Griffith und seinem Team durchgeführt.

Man analysierte die gesamten Feldversuche und durchgeführten Cloud Seeding Operationen, die in Santa Barbara Kalifornien bereits seit 1950 stattfanden.

Die Analyse ergab drei Zonen um das beflogene Zielgebiet, welche von Extra Area Effekten betroffen waren.

Die Primäre Zone lag zwischen 0-50 km Entfernung zum Zielgebiet, die sekundäre Zone erstreckte sich bis zu 100 km Entfernung. Bei beiden Zonen wurden die Extra Area Effekte durch den Antransport von Silberjodid oder Eispartikeln aus dem geseedeten Gebiet bewirkt.

Die Tertiäre Zone lag in 100-150km Entfernung und wurde durch mesoskalige Dynamiken der eintreffenden Wolken beeinflusst. Insgesamt konnte in allen Zonen eine Vergrößerung des Niederschlags nachgewiesen werden (Griffith et al. 2005).

Zu Bedenken ist, dass Wolken nicht statisch am Himmel stehen, sondern sich in Bewegung befinden.

So wandern geseedete Wolken über die Grenzen des Zielgebiets hinaus und es kommt zu erhöhten Niederschlägen in auswertigen Gebieten.

Fakt ist auch, dass ein Großteil des in der Wolke vorhandenen Wasserdampfes nicht auf einmal als Niederschlag fällt. Man geht davon aus, dass in etwa 51% des Wassers als Wasserdampf in der Atmosphäre vorliegt, 40% als Kondensiertes Wasser oder in der

Eisphase, und nur rund 9% fallen als Niederschlag. Bei einem geimpften Wolkensystem wird nur rund 1% des gesamten vorhandenen Wassers in Niederschlag umgewandelt. Für die geseedete Region macht es schon einen Unterschied wenn der gesamte Niederschlag um 1/9, also ca. 11% erhöht wird, für die in der Wolke enthaltenen Wassermengen bedeutet dies jedoch keine große Reduzierung.

Insgesamt kann davon ausgegangen werden, dass Extra Area Effekte eher positive Auswirkungen haben, und sich der Niederschlag in auswertigen Gebieten um 5-15 % erhöht (DeFelice et al. 2013, 194ff.).

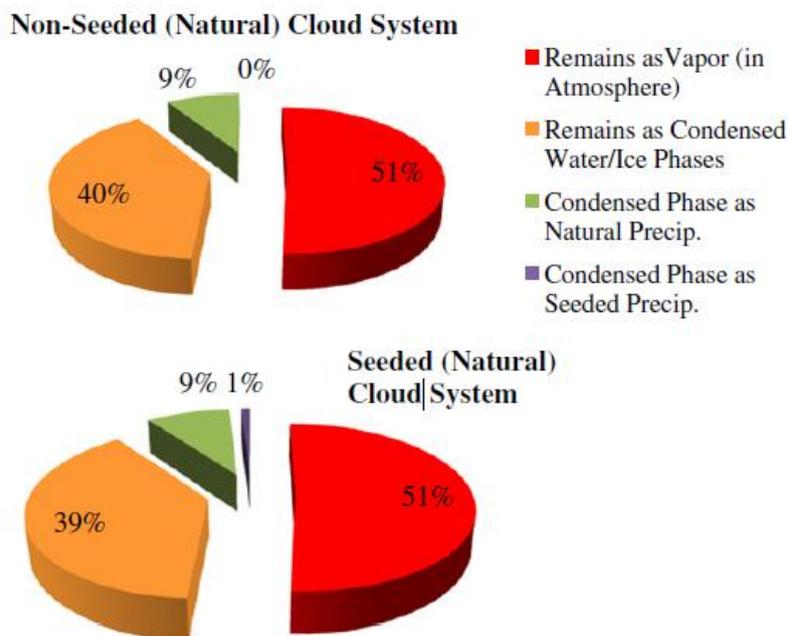


Abbildung 20: Wasserverteilung innerhalb eines natürlichen Wolkensystems und eines geseedeten Wolkensystems (DeFelice et al. 2013, 195)

3.2.3. Auswirkungen des Veränderten Niederschlagshaushalts auf die Umwelt

Eine weitere Frage wäre, ob der Eingriff in den Niederschlagshaushalt einer Region Langzeitauswirkungen für die dortige Flora und Fauna haben kann. Selbst wenn die induzierten Veränderungen innerhalb der natürlichen Variabilität liegen, können Pflanzen und Tiere darauf reagieren.

Cloud Seeding Operationen können das Wetter verändern und man nimmt deshalb an, dass sie einen Einfluss auf das Ökosystem haben.

Schätzungen gehen davon aus, dass es beispielsweise durch die Erhöhung des Niederschlags zu einem stärkeren Abfluss in den Gewässern kommt. Dies kann Auswirkungen für die Lebensbedingungen der im Fluss ansässigen Organismen haben. Auch wird theoretisch durch den erhöhten Abfluss mehr Wasser in die Seen eingebracht, was dort zum Teil Auswirkungen auf den Nährstoffhaushalt haben kann (Edmondson 1974, 90).

Bis jetzt liegen jedoch noch keine genaueren Erkenntnisse vor, dass durch die Veränderung des Wetters mittels Cloud Seeding, es zu Auswirkungen für die Umwelt kommen kann. Andere Untersuchungen gehen davon aus, dass Cloud Seeding nur ein weiterer Faktor, der sich konstant ändernden Wetterbedingungen, für die Umwelt ist und keinen größeren Einfluss hat. Nachforschungen in dieser Hinsicht sollten jedoch angestrengt werden, um einen genaueren Überblick über die Situation zu erlangen (Dennis 1980,237f.)

4. Diskussion:

Diese Arbeit hat sich mit den unterschiedlichen Methoden und Anwendungsbereichen des Cloud Seeding beschäftigt. Auch wurde auf mögliche Kritikpunkte der Vorgehensweise eingegangen, wie der Effizienz oder den Umweltauswirkungen.

Bei den Methoden wurden das Statische, Dynamische und Hygroskopische Cloud Seeding vorgestellt. Grundsätzlich ist das Ziel des Cloud Seeding, durch Einbringen künstlicher Gefrier- oder Kondensationskerne die mikrophysikalische und die dynamische Struktur der Wolke zu beeinflussen.

Die angewandte Methode steht dabei in Abhängigkeit von den Bedingungen, welche in einer Wolke vorherrschen.

Das Statische und Dynamische Cloud Seeding erfolgt anhand des Bergeron-Findeisen Prozesses. Erforderlich ist das ausreichende Vorhandensein unterkühlten Wassers (Cotton & Pielke 2007, 11).

Geeignete Wolken sind in dieser Hinsicht für das Statische Cloud Seeding kalte, kontinentale Wolken.

Eingesetzt wird diese Methode eher in den Mittleren Breiten. Besonders für die Hagelprävention hat sie sich als äußerst effektiv erwiesen. Von Nachteil ist der Einsatz chemischer Stoffe, deren Auswirkungen für die Umwelt noch nicht genau bekannt sind.

Das Dynamische Cloud Seeding benötigt eher warme, maritime Wolken, die ebenfalls unterkühltes Wasser enthalten. Versuche in den Tropen und Subtropen konnten Reaktionen der Wolken auf den Seeding Einsatz nachweisen. In den Mittleren Breiten blieb die Anwendung hingegen ineffektiv. Bei dieser Methode kommen auch chemische Stoffe zum Einsatz, es ergeben sich in dieser Hinsicht dieselben Bedenken, wie bei der Statischen Methode.

Beim Hygroskopischen Cloud Seeding versucht man den Niederschlag zu intensivieren oder auszulösen, indem man die Kollision und die Koaleszenz durch das Ausbringen von Kondensationskernen verstärkt. Diese Methode wird eher bei warmen, maritimen Wolken angewandt, welche kein unterkühltes Wasser enthalten, und bei denen die Bildung des Niederschlags von Natur aus anhand des Koaleszenz-Prozesses stattfindet. Als Impfmateriale verwendet man Salze, die ökologisch unbedenklich sind (Storch & Flöser 1999, 151).

Bezüglich der Effizienz des Cloud Seedings besteht in der Wissenschaft noch eine gewisse Uneinigkeit.

All die zuvor aufgeführten Methoden haben sich in der Theorie und bei Experimenten im Labor als effektiv und effizient erwiesen. Problematisch gestalten sich jedoch die Versuche diese Methoden anhand von Feldversuchen unter natürlichen Bedingungen nachzuweisen.

Bei Wolken, die einmal geseedet sind lässt sich im Nachhinein schlecht feststellen, ob diese anders reagiert hätte, falls kein Impfstoff in sie induziert worden wäre. Zwar gibt es Kontroll-Gebiete und auch Kontroll-Wolken, in welchen kein Cloud Seeding stattfindet, und in denen Vergleichsmessungen vorgenommen werden können. Aber die Rahmenbedingungen innerhalb anderer Wolkensysteme können ähnlich, jedoch niemals identisch sein. Somit können, anders als bei Laborversuchen, niemals zwei Versuche im Feld unter den exakt gleichen Bedingungen durchgeführt werden.

Messungen können teilweise irreführende Ergebnisse liefern. So werden auf Radarbildern Prozesse zur Niederschlagsbildung nach dem Einbringen des Impfstoffes nachgewiesen, trotzdem fällt kein Niederschlag. Es ist somit wichtig bei Experimenten sowohl Radardaten auszuwerten, als auch Messungen am Erdboden vorzunehmen.

Bisher ist noch nicht genau bekannt, wie genau die Reaktionen in der Wolke nach einer Impfung mit Seeding Material verlaufen. Somit lässt sich auch schwer sagen weshalb einige Experimente erfolgreich sind, wohingegen bei anderen keinerlei Auswirkungen festgestellt werden kann. Für das Statische Cloud Seeding hat man im Verlauf von Feldversuchen über mehrere Jahre erst erkannt, dass bestimmte Bedingungen, wie Temperatur oder das

Vorhandensein unterkühlten Wassers, innerhalb der Wolken vorherrschen müssen, damit das eingebrachte Material überhaupt wirksam sein kann.

Die Reaktionsschritte des Dynamischen Cloud Seeding, welche nach Einbringen des Materials theoretisch erfolgen sollten, konnten in der Praxis bisher nie nachgewiesen werden. Weshalb man das wirtschaftliche Interesse an dieser Methode verloren hat, auch weil diese Praxis mit hohen Kosten verbunden ist, da eine wesentlich größere Menge an Seeding Material, in Form von Silberjodid, benötigt wird.

Hygroskopisches Cloud Seeding ist noch relativ neu und zeigt sich bisher als recht vielversprechend. Genauere Untersuchungen sind jedoch noch nötig, um die Effizienz dieser Methode nachzuweisen.

Den Ansichten der Autorin nach, handelt es sich beim Cloud Seeding um eine theoretisch effiziente Methode. Die, wenn sie zur richtigen Zeit und am richtigen Ort zum Einsatz kommt, durchaus dazu in der Lage ist die gegebenen Wetterbedingungen zu beeinflussen. Wie bereits beschrieben liegt hierbei die Problematik in dem Umstand, dass die genauen Vorgänge und Reaktionen innerhalb einer Wolke bisher noch nicht genau bekannt sind. Dies erschwert die effiziente Durchführung eines Cloud Seeding Einsatzes, um ein optimales Ergebnis zu erhalten.

Des Weiteren müssen mögliche negative Auswirkungen auf die Umwelt und den Menschen durch die Anwendung dieser Methode kritisch betrachtet werden.

Befürchtet wird vor allem, dass durch den Einsatz chemischer Stoffe die Natur oder der Mensch Schaden nehmen könnte. Grundsätzlich kommen beim Cloud Seeding verschiedene Materialien zum Einsatz, am häufigsten wird jedoch Silber Jodid verwendet.

Freie Silber Ionen sind nachweislich durchaus schädlich für die Umwelt und den Menschen.

Da Silberjodid jedoch eine recht stabile Verbindung ist, besteht keine hohe Distribution freier Silber Ionen anhand von Cloud Seeding. Auch wurde in Untersuchungen festgestellt, dass die verwendete Menge an Impfmateriale eine zu geringe Konzentration hat, um merkliche Folgen in den betroffenen Regionen zu haben (Tsiouris et al. 2002, 700).

Es muss aber angemerkt werden, dass die Meinungen zu diesem Thema divergieren.

So gibt es Stimmen in der Wissenschaft, die von einer völligen Unbedenklichkeit der Methode ausgehen. Andere führen jedoch an, dass die Ausbringung von Silberjodid durchaus Folgen für die Umwelt haben könnte. Schätzungen gehen davon aus, dass in Gebieten, über denen seit Jahrzehnten regelmäßig Silberjodid verteilt wird, es zu einer Anreicherung des Materials im Boden kommen kann. Dies hat keine weitreichenden Auswirkungen für die

Gesundheit des Menschen, kann aber Mikroorganismen im Boden und im Wasser schädigen, da diese bereits auf sehr geringe Konzentrationen von Silber Ionen äußerst empfindlich reagieren (Fajardo et al. 2016, 434).

Untersuchungen hierzu sind jedoch noch nicht umfangreich genug. Empfehlenswert wäre, in von Cloud Seeding betroffenen Gebieten regelmäßige Untersuchungen des Bodens vorzunehmen.

Andere Materialien mit hygroskopischen Eigenschaften, die zum Einsatz kommen werden, wie Natrium Chlorid, besitzen keine Toxizität. Auch kann eine befürchtete Versalzung des Bodens ausgeschlossen werden, da die eingetragenen Mengen zu gering sind.

Weitere befürchtete Auswirkungen auf die Umwelt sind die sogenannten „Extra Area“ Effekte. Es wird davon ausgegangen, dass die künstliche Erhöhung des Niederschlags den Niederschlag in einer benachbarten Region senken kann. Diese Hypothese kann jedoch eindeutig widerlegt werden. So besitzt Cloud Seeding eher den gegenteiligen Effekt, und hat positive Auswirkungen auf benachbarte Regionen. In mehreren Versuchen ist gemessen worden, dass es zu einer Erhöhung des Niederschlags in angrenzenden Regionen kam. Man geht davon aus, dass sich die geseedeten Wolken über die Grenzen der Einsatzregion hinausbewegen und dort höhere Niederschläge eintragen. Auch vermutet man, dass sich die mikrophysikalischen und dynamischen Prozesse innerhalb eines Wolkensystems weiter fortsetzen.

Des Weiteren bedeutet eine Erhöhung des Niederschlags um ca. 10-15% nur eine 1% Erhöhung der Wasserentnahme aus der gesamten in der Wolke vorhandenen Wassermasse (DeFelice et al. 2013, 195).

Letztendlich befürchtet man die potenzielle Einflussnahme auf das Ökosystem anhand der Veränderung des Wasserhaushalts. Die Annahmen gehen hierbei jedoch auseinander.

In einigen Forschungsberichten geht man davon aus, dass die Erhöhung des Niederschlags zu Veränderungen innerhalb des Ökosystems führen kann. Andere Experten vertreten wiederum die Ansicht, dass dies keinerlei Auswirkungen auf die Natur hätte, da Wetteränderungen durch Cloud Seeding in den Rahmen der natürlichen Variabilität fallen. Problematisch ist hierbei, dass die dazu gefundenen Berichte aus den 70er und 80er Jahren stammen und somit veraltet sind. Neuere Studien sind für diese Arbeit nicht gefunden worden. Der Verfasserin dieser Bachelorarbeit ist nicht bekannt, ob diese Hypothese widerlegt werden konnte, oder ob noch Untersuchungen dazu durchgeführt wurden.

Letztendlich stellt sich auch die Frage, ob Cloud Seeding im Anbetracht des Klimawandels häufiger zum Einsatz kommen wird.

Bezüglich der beiden behandelten Anwendungsbeispiele Hagelabwehr in Bayern und Rain Enhancement in Dubai haben sich verschiedene Entwicklungsmöglichkeiten aufgezeigt.

So ist man sich bei der Hagelhäufigkeit unsicher, ob diese in Zukunft zunehmen wird. Die einen Hagelprognosen sagen eine Zunahme um 90% voraus, die anderen prognostizieren wiederum einen Rückgang. Aussagen des Hagelabwehr Rosenheim zufolge konnte in den letzten paar Jahren keine Zunahme der Hagelunwetter verzeichnet werden.

Demzufolge lässt sich abschätzen, dass es in Zukunft nicht zu häufigeren Hageleinsätzen kommen wird. Jedoch muss davon ausgegangen werden, dass die Hagelunwetter früher im Jahr stattfinden werden. Auch müssen bei Voraussagen von Gewittern die Cloud Seeding Operationen schneller ablaufen, da die Unwetter im Zuge der Erwärmung nicht zwangsläufig häufiger, aber extremer werden.

Cloud Seeding zum Zweck der Niederschlagserhöhung wird höchstwahrscheinlich in ariden und semiariden Ländern zukünftig vermehrt zum Einsatz kommen. Grund ist die prognostizierte Zunahme von Dürren und Hitzewellen.

In den VAE versucht man auch unabhängig vom Klimawandel die Wassergewinnung durch Cloud Seeding zu steigern. Die Bevölkerung des Staates wird weiterhin konstant wachsen und somit auch der Wasserbedarf. Bereits heute übersteigt die Wasserentnahme die Regenerierbarkeit des vorhandenen Grundwassers bei weitem.

Das Land ist somit stark abhängig von der Wassergewinnung aus Entsalzungsanlagen.

Diese bergen jedoch den Nachteil, dass sie sehr energieintensiv sind. Die Kosten für die Betreibung dieser Anlagen sind somit äußerst hoch. Auch ist der Betrieb nicht nachhaltig, da die Maschinen mit Erdöl und Erdgas betrieben werden. Des Weiteren ist diese Art der Wassergewinnung auch nicht krisensicher. Bei einem Ausfall der gesamten Entsalzungsanlagen, würde die gesamte Wasserversorgung des Landes innerhalb von einem Tag zusammenbrechen. Bei einem gewaltsamen Konflikt mit Nachbarstaaten, würden die Desalinationsbetriebe eines der ersten Angriffsziele sein. Man versucht sich von dieser Art der Wassergewinnung unabhängiger zu machen, indem man die Erneuerung natürlicher Wasserquellen durch das Einbringen künstlich erzeugten Regens unterstützt.

Anhand dieser beiden Beispiele erkennt man, dass der zukünftige Einsatz des Cloud Seedings nicht nur von der klimatischen Entwicklung, sondern auch vom Bevölkerungswachstum und der politischen Situation abhängig ist.

Die Autorin geht davon aus, dass Cloud Seeding als eine mögliche Option eingesetzt werden wird, um auf Auswirkungen des Klimawandels zu reagieren.

Ob dies aber eine wirkungsstarke Maßnahme ist, wird sich erst mit der Zeit zeigen.

Es ist zu bedenken, dass Cloud Seeding nicht bei jeglichen Wolkenbedingungen durchgeführt werden kann, sondern gewisse Gegebenheiten in der Wolke vorherrschen müssen. Ob in Zukunft die geeigneten Bedingungen gegeben sein werden, kann man bisher noch nicht sagen. Auch steht man vor dem Problem, dass viele wissenschaftliche Fragen im Bezug auf die optimale Durchführung einer Cloud Seeding Operation noch nicht genau beantwortet werden konnten.

Schätzungen der Autorin nach kann Cloud Seeding eine Option sein, um auf, durch den Klimawandel, verstärkte Wetterphänomene zu reagieren. Es kann jedoch nicht daraus geschlossen werden, dass Auswirkungen des Klimawandels hierdurch behoben werden. Es ist eher von einer milden Abschwächung der Probleme auszugehen.

5. Fazit

Cloud Seeding wird bereits seit über einem halben Jahrhundert betrieben und ist eine vielseitig einsetzbare Methode.

Die Durchführung der Operation ist abhängig von den in der Wolke vorherrschenden Bedingungen. Während bei kalten, kontinentalen Wolken versucht wird anhand des Bergeron-Findeisen-Prozesses Einfluss auf die mikrophysikalischen und dynamischen Eigenschaften zu nehmen. Basiert das Cloud Seeding bei warmen, maritimen Wolken auf der Niederschlagsbildung durch Kollision und Koaleszenz an.

Die Anwendungsbereiche sind recht unterschiedlich, hauptsächlich wird jedoch versucht das Niederschlagspotenzial einer Wolke zu steigern.

Kritik an der Methode besteht vor allem bezüglich der möglichen Umweltschäden und der Nachweisbarkeit der Effizienz.

Befürchtungen, dass es durch das Ausbringen von Silberjodid zu einer Eintragung toxischer Silber Ionen in den Boden und die Gewässer kommt, konnten widerlegt werden.

Auch Kritiken, die davon ausgingen, dass Cloud Seeding zu einer Reduzierung des Niederschlags in angrenzenden Gebieten führen würde, erwiesen sich als falsch.

Problematisch ist hingegen die Nachweisbarkeit der Effizienz dieser Methode.

Bisher ist es noch nicht gelungen Cloud Seeding mit Hilfe von Feldversuchen eindeutig wissenschaftlich zu verifizieren. Dies bedeutet jedoch nicht, dass die Methode wirkungslos wäre. So können Niederschlagssteigerungen nach der Durchführung der Operation beobachtet werden. Diese erfolgen jedoch nicht immer. Somit sind die Ergebnisse des Cloud Seedings außerhalb des Labors bisher immer recht willkürlich ausgefallen.

Für die Verbesserung und Weiterentwicklung der Methode sind weitere Forschungsprogramme erforderlich, um die genauen Reaktionsketten innerhalb der Wolken nach dem Ausbringen des Seeding Materials nachvollziehen zu können. In der Theorie sind diese zwar bereits bekannt, es ist aber schwierig sie in der Praxis nachzuweisen.

Hilfreich wären langjährige und großflächige randomisierte Feldversuche des Cloud Seedings. Auch bräuchte man dafür bessere Radarsysteme, die genauere Messungen vornehmen können.

Anhand zusätzlicher Forschung wäre es möglich die Methode weiterzuentwickeln und zu optimieren.

IV. Literaturverzeichnis

Ahrens, C. D. (2007): *Meteorology Today – An Introduction to Weather, Climate, and the Environment*. Belmont.

Al Awar, M.M. (2014): Management of Water Resources in the UAE. In: *International Journal of Environment and Sustainability*. Vol. 3 No. 4. 1-10.

Al-Nuaimi, H.; Murad, A. (2007): The role of dams in securing the surface water in the northern and eastern parts of the United Arab Emirates (UAE). In: Giesen, N.; Jun, X.; Rosbjerg, D.; Fukushima, Y. (2007): *Changes in Water Resources Systems: Methodologies to Maintain Water Security and Ensure Integrated Management*. 206-214.

Al Rifai, N. (2018): Seeds in the clouds: A timeline of UAE's rain enhancement journey since 1982. URL: https://www.zawya.com/mena/en/story/Seeds_in_the_clouds_A_timeline_of_UAEs_rain_enhancement_journey_since_1982-ZAWYA20180118055420/. (14.05.2018).

Bardsley, D. (2018): Is there a way to make cloud seeding more effective. URL: <https://www.thenational.ae/uae/science/is-there-a-way-to-make-cloud-seeding-more-effective-1.709687>. (Stand: 18.06.2018).

Belyaeva, M.V.; Drofa, A.S.; Ivanov, V.N. (2012): Efficiency of Stimulating Precipitation from Convective Clouds Using Salt Powder. In: *Atmospheric and Oceanic Physics* (2013). Vol. 49. Nr. 2. 154-161.

Braham, R.R.; Battan, L.J.; Byers, H.R. (1957): Artificial nucleation of cumulus clouds. In: Petterssen, S.; Spar, J.; Hall, F.; Braham, R.R.; Battan, L.J.; Byers, H.R.; Kampe, H.J.; Kelly, J.J.; Weickermann, H.K. (1957): *Clouds and weather modification: A group of field experiments*. Vol. 2. Boston. 47-85.

Caviezel, C.; Revermann, C. (2014): Climate Engineering, Kann und soll man die Erderwärmung technisch eindämmen?. Berlin. URL: <https://www.tab-beim-bundestag.de/de/pdf/publikationen/buecher/care-2014-159.pdf>. (Stand: 01.05.2018).

Cotton, W. R.; Pielke Sr, R. A. (2007): Human Impacts on Weather and Climate. Cambridge.

Curic, M.; Janc, D. (2012): Wet deposition of seeding agent after weather modification activities. In Environ Scie Pollut Res (201) 20. 6344-6350.

DeFelice, T.P.; Golden, J.; Griffith, D.; Woodley, W.; Rosenfeld, D.; Breed, D.; Solak, M.; Boe, B. (2013): Extra area effects of cloud seeding – An updated assessment. In: Atmospheric Research 135-136 (2014). 193-203.

Dennis, A.S. (1980): Weather Modification by Cloud Seeding. New York.

Dennehy, J. (2018): The rain men: everything you need to know about UAE`s cloud seeding missions. URL: <https://www.thenational.ae/uae/environment/the-rain-men-everything-you-need-to-know-about-uae-s-cloud-seeding-missions-1.696289>. (Stand: 07.06.2018).

DWD (Deutscher Wetterdienst): Inhaltsstoffe im Niederschlag. URL: https://www.dwd.de/DE/forschung/atmosphaerenbeob/zusammensetzung_atmosphaere/aerosol/inh_nav/regeninhaltsstoffe_node.html;jsessionid=F9231C439AFCAAF894A66B019B642E40.live21073#doc498494bodyText1. (Stand: 10.06.2018).

Edmondson, W.T. (1974): Ecology and Weather Modification. In: Fleagle, R. (Hrsg.) (1974): Weather Modification. Science and Public Policy. Seattle. 87-93.

Fajardo, C.; Costa, G.; Ortiz, L.T.; Nande, M.; Rodríguez-Membibre, M.L.; Martín, M.; Sánchez-Fortún, S. (2016): Potential risk of acute toxicity induced by AgI cloud seeding on soil and freshwater biota. In: Exotoxicology and Environmental Safety 133 (2016) 433-441.

GDV (Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V.) (2016): Naturgefahrenreport 2016. Die Schaden-Chronik der deutschen Versicherer in Zahlen, Stimmen und Ereignissen. Berlin.

Gilstad, A. (2004): Cloud Seeding 201: Operations Targeting. URL: http://www.swc.nd.gov/arb/news/atmospheric_reservoir/pdfs/2004_07%20-%20Cloud%20Seeding%20201%20-%20Operations%20Targeting.pdf. (Stand: 29.5.2018).

Giwa, A.; Dindi, A. (2017): An investigation of the feasibility of proposed solutions for water sustainability and security in water-stressed environment. In: Journal of Cleaner Production 165 (2017). 721-733.

Glaser, R. (2013): Klimageographie. In: Gebhardt, H.; Glaser, R.; Radtke, U.; Reuber, P. (2013): Geographie. Physische Geographie und Humangeographie. Heidelberg. 231-347.

Gonzalez, R.; Ouarda, T.B.M.J.; Marpu, P.R.; Allam, M.M.; Eltahir, E.A.B.; Pearson, S. (2016): Water Budget Analysis in Arid Regions Application to the United Arab Emirates. URL: <http://www.mdpi.com/2073-4441/8/9/415>. (Stand: 13.05.2018).

Griffith, D. A.; Solak, M.E.; Almy, D.P., Gibbs, D. (2005): The Santa Barbara Cloud Seeding Project in Coastal Southern California, Summary of Results and their Implications. In: Journal Weather Modification. Nr. 37. 21-27.

Häckel, H. (2016): Meteorologie. Stuttgart.

Hagelabwehr Rosenheim a (Hrsg.): Hagelabwehr Rosenheim. Geschichtliches. URL: <http://www.hagelabwehr-rosenheim.de/geschichtliches.php>. (Stand: 12.05.2018).

Hagelabwehr Rosenheim b (Hrsg.): Hagelabwehr Rosenheim. Einsatzgebiet. URL: <http://www.hagelabwehr-rosenheim.de/einsatzgebiet.php>. (Stand: 12.05.2018).

Havens, B.S.(1952): Report NC. RL-TEG, History of Porject Cirrus. New York. URL: <https://archive.org/details/historyofproject00have>. (Stand: 30.04.2018).

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

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2014): Klimaänderung 2014 Synthesebericht. URL: https://www.ipcc.ch/pdf/reports-nonUN-translations/deutch/IPCC-AR5_SYR_barrierefrei.pdf. (Stand: 16.05.2018).

Klose, B. (2008): Meteorologie. Eine interdisziplinäre Einführung in die Physik der Atmosphäre. Heidelberg.

Korneev, V.P.; Potapov, E.I.; Shchukin, G.G. (2016): Environmental Aspects of Cloud Seeding. In: Russian Meteorology and Hydrology, 2017, Vol. 4, No. 7. 477-483.

Kunz, M.; Mohr, S.; Werner, P. (2017): Niederschlag. In: Brasseur, G.P.; Jacob, D.; Schuck-Zöllner, S. (2017): Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Berlin Heidelberg. 57-66.

Kurz, M. (1986): Die Entwicklung der Wetterlage des Münchner Hagelunwetters vom 12. Juli 1984. In: DWD (Deutscher Wetterdienst) (Hrsg.) (1986): Berichte des Deutschen Wetterdienstes. Nr. 170. Offenbach am Main.

Levin, Z. (2009): On the State of Cloud Seeding for Rain Enhancement. URL: http://www.tau.ac.il/~zevlev/pub_files/Levin-On-the-state-of-cloud-seeding-CyI-report-2009-7C6360C0d01.pdf

Mather, G.K.; Terblanche, D.E.; Steffens, F.E.; Fletcher, L. (1996): Results of the South African cloud seeding experiments using hygroscopic flares. In: Journal of Applied Meteorology (1997) Volume 36, 1434-1447.

Mohr, S.; Kunz, M.; Keuler, K. (2014): Development and application of a logistic model to estimate the past and future hail potential in Germany. In: Journal of Geophysical Research: Atmospheres. (2015). 3939-3956.

NCAR (National Center of Atmospheric Research) (Hrsg.) (2005): Rainfall enhancement assessment Program. United Arab Emirates (2001-2005). Boulder. URL: <http://www.ncm.ae/en/ncms-book-details.html?id=06#page/326>. (Stand: 11.05.2018).

Nickl, T.: Bildergalerie. URL: www.hagelabwehr-rosenheim.de/galerie.php. (Stand: 20.05.2018).

OnTheWorldMap: Road map of United Arab Emirates. URL: <http://ontheworldmap.com/uae/road-map-of-united-arab-emirates.html>. (Stand: 14.06.2018).

Pachatz, G. (2005): Analyse der Effizienz der Hagelabwehr in der Steiermark anhand von Fallbeispielen. Graz.

Pike, J. (1983): Groundwater Resources Development and the Environment in the Central Region of the Arabian Gulf. In: International Journal of Water Resources Development. 115-132.

Reuters (Hrsg.) (2008): In Russia, sometimes it rains cement. URL: <https://www.reuters.com/article/us-russia-weather/in-russia-sometimes-it-rains-cement-idUSL1760049120080617?feedType=RSS%20=true>. (Stand: 12.05.2018).

Sävert, T.: Hagelkorn >9cm 1984 München. URL: <http://www.saevert.de/bilder/840712hagelkorn.jpg>. (Stand: 20.05.2018).

Schmitt-Lermann, H. (1984): Der Hagel und die Hagelversicherung in der Kulturgeschichte. München.

Solak, M.; Griffith, D.A.; Yorty, D.P. (2003): Estimations of downwind cloud seeding effects in Utah. In: Journal Weather Modification. Nr. 35. 52-58.

Steininger, K.W.; Steinreiber, C.; Ritz, C. (Hrsg.) (2005): Extreme Wetterereignisse und ihre wirtschaftlichen Folgen. Anpassung, Auswege und politische Forderungen betroffener Wirtschaftsbranchen. Heidelberg.

STMUV (Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz) (Hrsg.) (2015): Klima-Report Bayern 2015; Klimawandel, Auswirkungen, Anpassungs- und Forschungsaktivitäten. München. URL:

[https://www.bestellen.bayern.de/application/eshop_app000007?SID=463192149&ACTIONxSESSxSHOWPIC\(BILDxKEY:%27stmuv_klima_008%27,BILDxCLASS:%27Artikel%27,BILDxTYPE:%27PDF%27](https://www.bestellen.bayern.de/application/eshop_app000007?SID=463192149&ACTIONxSESSxSHOWPIC(BILDxKEY:%27stmuv_klima_008%27,BILDxCLASS:%27Artikel%27,BILDxTYPE:%27PDF%27). (Stand: 14.06.2018).

Storch, H. von; Flöser, G. (Hrsg.), (1999): Anthropogenic Climate Change. Berlin, Heidelberg.

Svabik, O. (2004): Hagelabwehr in der Steiermark 1982-2001 mit begleitender Untersuchung der ZAMG. Wien.

Taylor-Evans, D.; Coyne, D. (2013): United Arab Emirates Yearbook 2013. Abu Dhabi. URL: <https://www.mofa.gov.ae/EN/Documents/3556.pdf> . (Stand: 06.06.2018).

Tsiouris, S.E.; Aravanopoulos, F.A.; Papadoyannis, I.N.; Sofoniou, M.K.; Polyzopoulos, N.; Christodoulou, M.; Samanidou, V.F.; Zachariadis, G.A.; Constantinidou, H.I.A. (2002): Soil Silver Content of Aricultural Areas subjected to Cloud Seeding with Silver Iodide. In: Frensenius Environmental Bulletin. Vol. 11. Nr.9b. 697-702.

UAE Government : National Innovation Strategy. URL: <https://government.ae/en/about-the-uae/strategies-initiatives-and-awards/federal-governments-strategies-and-plans/national-innovation-strategy>. (Stand: 16.05.2018).

UAEREPa (UAE Research Program for Rain Enhancement Science): About Rain Enhancement. URL: <http://www.uaerep.ae/en/app/rain-enhancement/16>. (Stand: 16.05.2018).

UAEREPb (UAE Research Program for Rain Enhancement Science): Awardees. URL: <http://www.uaerep.ae/en/awardees/2017/550>. (Stand: 16.05.2018).

UAEREPc (UAE Research Program for Rain Enhancement Science): The Award. The Grant. URL: <http://www.uaerep.ae/en/app/the-grant/231>. (Stand: 16.05.2018).

UN-ESCWA (United Nations Economic and Social Commission for Western Asia); **BGR** (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe): The Inventory of Shared Water Resources in Western Asia. Chapter 14. Umm er Radhuma-Dammam Aquifer System (South) Rub` al Khali. URL: <https://waterinventory.org/groundwater/umm-er-radhuma-dammam-aquifer-system-south>. (Stand: 14.05.2018).

Vogl, G. (2018 a): Fragebogen zur Hagelabwehr im Landkreis Rosenheim. Rosenheim.

Vogl, G. (2018 b): Interview zum Thema Hagelabwehr im Landkreis Rosenheim. Rosenheim.

Wagner, M. (2001): Bericht von Manuela Wagner zum Hagelunwetter am 12. Juli 1984 in München. URL: http://www.sturmwetter.de/texte/120784_2.htm. (Stand: 20.05.2018).

Williams, B.D.; Denholm, J.A. (2009): An Assessment of the Environmental Toxicity of Silver Iodide – With Reference to a Cloud Seeding Trial in the Snowy Mountains of Australia. In: J. Water Modif. 41. 75-96.

Zentgraf, P. (2014): RO-BERTA. Ein Beitrag zur Unterstützung der Rosenheimer Hagelflieger-Piloten.. Rosenheim.

V. Anhang 1:

Fragebogen zur Hagelabwehr im Landkreis Rosenheim

Dieser Fragebogen wurde am 07.05.2018 an Herrn Georg Vogl, dem Einsatzleiter der Hagelabwehr Rosenheim, im Vorfeld des Interviews geschickt.

Am 14.05.2018 wurde mir der beantwortete Fragebogen wieder zugeschickt.

Inhalt des Fragebogens:

Sehr geehrter Herr Vogl,

mein Name ist Hannah Scheicher und ich studiere im 6ten Semester Geographie an der Ludwig – Maximilians Universität in München.

Im Moment schreibe ich meinen Bachelor zu dem Thema „Anwendungen des Cloud Seedings im methodischen und regionalen Vergleich“.

In meiner Arbeit befasse ich mich auch mit dem Thema der Hagelprävention in Oberbayern.

Ich wende mich an Sie, da Sie der Einsatzleiter der Hagelabwehr Rosenheim sind.

Falls Sie Zeit haben, würde ich gerne folgende Fragen zu dem Thema an Sie richten.

1. *Kann die Effizienz des Cloud Seedings zur Hagelprävention wissenschaftlich nachgewiesen werden?*

Hierzu gibt es verschiedene Studien aus Europa und den USA die mit unterschiedlichen Ansätzen eine Evaluierung der Impfmaßnahmen versuchen. Hier ist z.B. die Langzeitstudie von Herrn Dr. Svabik von der ZAMG in Wien zu nennen, der eine erhebliche Reduzierung der Hagelschäden durch die Impfmaßnahmen bestätigt.

Informationen hierzu wie auch zu anderen Studien finden Sie im Internet. Für Sie von Interesse vielleicht auch eine aktuelle Literaturrecherche der Uni Furtwangen

<https://opus.hs-furtwangen.de/frontdoor/index/index/docId/1664>

2. *Welche Institutionen finanzieren die Hagelprävention in Oberbayern?*

Im Raum Rosenheim wird die Hagelabwehr überwiegend durch den Landkreis Rosenheim finanziert. Finanziell beteiligen sich aber auch die weiteren Landkreise Miesbach und Traunstein, die kreisfreie Stadt Rosenheim sowie Gemeinden aus den

Bezirken Kufstein und Kitzbühel in Tirol. Einen 25% Beitrag zu den Flugeinsatzkosten leistet auch der Hagelforschungsverein.

- 3. Gibt es andere Möglichkeiten, außer dem Cloud Seeding, um Hagelprävention zu betreiben?*

Weitere Möglichkeiten, die in der Landwirtschaft und im Weinbau angewandt werden, sind das überspannen von Flächen mit sog. Hagelschutznetzen. Auch die rechtzeitige Sicherung gefährdeter Gegenstände (Autos in Garagen etc.) hat präventive Wirkung.

- 4. Wann ist die Hauptsaison in der Hagelstürme abgewehrt werden müssen?*

In unseren geografischen Breiten liegt die Hauptsaison in der Zeit von Mitte Mai bis Mitte August. Dieser Zeitraum kann sich aber durchaus durch entsprechende Großwetterlagen ausdehnen oder auch um mehrere Wochen verschieben.

- 5. Wann ist der geeignetste Zeitpunkt, um das Silberjodid in die Wolke einzubringen?*

Der beste Zeitpunkt für die Wolkenimpfung ist im Entstehungsstadium einer Gewitterzelle, also dann, wenn die Umwandlungsprozesse von Wasserdampf in flüssige Teilchen und von insbesondere von Regentropfen in Eispartikel stattfinden.

- 6. Welche Methode ist am effizientesten, um Silberjodid in eine Wolke einzubringen?*

Das ist im Grunde von der jeweiligen Entwicklung abhängig. Weltweit durchgesetzt hat sich das sogenannte Base-Seeding und das On-Top-Seeding. Beim Base-Seeding nutzt man den Aufwind unter den Wolken, der dann die aus Silberjodid erzeugten Eiskeime in die interessanten Wolkenbereiche transportiert. Beim On-Top-Seeding kann man die Spitzen der interessanten Entwicklungen leichter erkennen und wirft quasi von oben eiskeimproduzierendes Material in die Gewitterwolken.

- 7. Besteht eine Zusammenarbeit zwischen Deutschland und anderen Ländern bezüglich der Erforschung des Cloud Seedings?*

Es gibt immer wieder internationale Treffen und Erfahrungsaustausch unter den Hagelabwehrtreibenden Organisationen. Informationen hierzu sammelt z.B. die WHO. Eine große amerikanische Vereinigung, die sich mit dem Thema Wetterbeeinflussung, Regenvermehrung und Hagelabwehr befasst ist die WMA
<http://weathermod.org/>

8. *Was für neue Erkenntnisse konnte man Dank der Projektes RO-BERTA über die Hagelabwehr gewinnen und dienen diese der Verbesserung des Verfahrens?*

Besonders interessant und wichtig für die Piloten im Einsatz sind die in das Cockpit übertragenen Radarbilder, die einen sehr aktuellen Überblick der herrschenden Gewittersituation geben. Zudem wird die Position des Flugzeuges übertragen, was dem beratenden Meteorologen am Boden bei der Einschätzung des idealen Impfortes hilft.

Weiterhin sind die Rückmeldungen vieler Wetterbeobachter zu nennen, die über eine App Rückmeldung über den Niederschlag seine Art und Stärke machen können.

Ich bedanke mich vielmals dafür, dass Sie sich die Zeit genommen haben meine Fragen zu beantworten.

Mit freundlichen Grüßen

Hannah Scheicher

VI. Anhang 2

Interview zum Thema Hagelabwehr im Landkreis Rosenheim

am 28.05.2018 um 9:00

Dauer:	58 min 32 s
Interviewer:	Georg Vogl <ul style="list-style-type: none">- Einsatzleiter der Hagelabwehr- Verwaltungsbeamter beim Landkreis Rosenheim- Geschäftsführer des Hagelforschungsvereins
Interviewer:	Hannah Scheicher

Am 28.05.2018 um 9:00 fand das Interview von Herrn Georg Vogl zur Hagelabwehr in Rosenheim statt. Das Interview wurde im Rahmen der Nachforschungen für die Bachelorarbeit „Anwendungen des Cloud Seeding im methodischen und regionalen Vergleich“ durchgeführt.

Verlauf des Interviews:

1. Sie sind ja bereits sehr lange im Einsatz, seit 1980, wie viele Einsätze sind Sie denn schon geflogen?

Das ist schwer zu sagen. Die Zahl der Einsätze kann ich nicht genau benennen. Ja angefangen habe ich 1980 schon und ja ca. 2000 Stunden kann ich von der Flugzeit her sagen. Durchschnittlich lässt sich davon ausgehen, dass ich ca. 1.500 Flüge geflogen bin

2. Wie viele Hageleinsätze sind Sie bisher im Jahr 2018 geflogen?

Im Jahr 2018 gab es bisher noch überhaupt keine Einsätze. Liegt aber nicht nur an der Wettersituation, die bisher noch keinen Einsatz erforderlich gemacht hat, sondern auch daran, dass wir momentan noch eine Zulassung benötigen. Aktuell fehlt uns noch das entsprechende Papier und ich warte stündlich auf die erlösende E-Mail, damit wir endlich loslegen können. Das hängt mit unseren Umbaumaßnahmen am Flugzeug zusammen. Wir mussten neue

Generatoren anschaffen und die benötigen eine Zulassung. Und diese Zulassung dauert. Das macht das Luftfahrt Bundesamt und das ist nicht ganz einfach. Beziehungsweise es läuft alles über die EASA, die europäische Zulassungsbehörde, aber die bedient sich wiederum des Luftfahrt Bundesamtes, der nationalen Behörde, um das Verfahren abzuwickeln. Und da zieht sich es gerade. Das ist aber auch nur ein temporäres und gerade in dieser Saison aufgeschlagenes Problem.

3. Gab es in dieser Saison auch schon Hagelstürme, wo Sie dann, auf Grund dieser Situation, nicht „Seeden“ konnten?

Wir wären wahrscheinlich zwei, dreimal in der Luft gewesen. Ja. Wobei es im Nachhinein nicht erforderlich gewesen ist. Es ist nichts passiert.

4. Wie viele Einsätze werden durchschnittlich pro Jahr geflogen?

Es ist immer unterschiedlich. Aber über die lange Zeit betrachtet sind wir so bei 15 bis 20 Einsatztagen. Also mit zwei Flugzeugen, wir fliegen immer mit beiden Maschinen in der Regel. Ja da kommt man so auf 30 bis 40 Einsätze. Macht somit 50 bis 70, 80 Einsatzstunden pro Jahr für beide Flugzeuge zusammengerechnet.

5. Wie verläuft ein regulärer Einsatz der Hagelabwehr?

Der fängt ganz normal morgens im Büro an. Wir machen ein Wetter Briefing. Das kann man selber machen über diverse Plattformen. Und für mich das wesentliche ist eine Software, die Piloten haben. Das sogenannte pc_met. Bei pc_met ist von der Wetterlage über verschiedenste Wetterkarten zu Satellitenbildern alles vertreten. Da gibt es sogenannte Meteogramme und da errechnet der Deutsche Wetterdienst verschiedene Parameter für die Region. Abgebildet sind Wind und Wolken, der Temperaturverlauf, der Wind extrahiert über die einzelnen Tage. Z.B. für heute ist vorausgesagt, dass es den ganzen Tag sonnig ist mit einem Temperaturverlauf von 25 bis 26°C. Erst morgen um 20:00 wird es zu Gewittern kommen, regnen wird es schon davor ab 18:00 Uhr. Von daher wird es morgen wieder so ähnlich wie gestern verlaufen. Also, dass in den Bergen Quellungen entstehen. Die werden dann halt immer größer und irgendwann blitzt und donnert es auch mal. Aber man sieht hier die Wolken können schon relativ hoch werden, die gehen schon bis 11 oder 12 km rauf. Also da ist grundsätzlich schon Potenzial für Hagel da. Es muss natürlich auch noch die

Feuchtigkeit mit hinzukommen. Die haben wir momentan in den Bergen noch, weil es sehr viel Schnee im Winter gegeben hat. Und dieser Schnee bildet jetzt das Feuchtigkeitsreservoir für diese Wolken. Im Flachland wird man diese Wolken nicht sehen, weil da bereits alles abgetaut ist, da ist die Feuchtigkeit schon weg. Aber in den Bergen ist noch genug da.

Also das ist etwas womit man sich einen generellen Überblick verschafft.

Und wenn, im Laufe des Tages, die ersten Quellungen erscheinen, gibt es ein weiteres Tool des Deutschen Wetterdienstes, das sogenannte KONRAD, eine Konvektionsanalyse aus Radarprodukten.

Hiermit erhält man das lokale Radarbild. Darauf sieht man dann die Wolken in verschiedenen Farben, diese Wolken sind dann klassifiziert von marginal bis extrem. Blitze werden auf den Bildern auch abgebildet.

Man muss natürlich bedenken, hinter diesen Produkten steckt sehr viel Computertechnik, sehr viel Computerleistung. Aber dahinter stecken natürlich auch Menschen. Und die interpretieren die Zahlen und Daten und da gibt es dann Unterschiede. Und auf das muss man sich natürlich auch einstellen und ein gewisser Teil der Wetterberatung ist einfach auch aus dem Fenster schauen. Wie stimmt das Wetter draußen mit dem zusammen was mir die Daten sagen. Gibt es Abweichungen davon. Gerade unser Phänomen Föhn ist für Meteorologen oder Systeme, die Wettervorhersagen machen, äußerst schwer zu erfassen. Dafür ist das Datennetz zu grob. Der Deutsche Wetterdienst hat eine Station in Prien, die nächste ist in Mühldorf und da liegen viele Kilometer dazwischen. Da kann man sich vorstellen, dass es natürlich sehr schwer ist solche Dinge zu erfassen.

Ich selber habe noch einen ausrangierten Höhenmesser aus einem Flugzeug, der mir einfach nur den Luftdruck zeigt und wenn der Luftdruck stark fällt, dann ist das für mich ein Indiz „Da passiert was“.

Da kommt eine Kaltfront. Und mit diesen Dingen kann man sich dann selber ein gewisses Bild der Situation verschaffen.

Es gibt auch einen Meteorologen in München, das Büro vom Dr. Sachweh. Die uns meteorologisch beraten. Wenn es heute kritisch wäre, wäre das, nach dem Wetter Briefing, mein erster Anruf.

Um die Meinung der dortigen Meteorologen einzuholen und zu erfahren, wie sie die Situation einschätzen.

Falls die Quellungen größer werden und die Front in unsere Nähe zieht fährt man zum Flugplatz. Macht die Flugzeuge einsatzklar, parallel dazu kontrolliert man die Wettersituation am Handy. Der Meteorologe kontrolliert das Wetter auch regelmäßig und wenn er die

Situation für brenzlich hält dann ruft er an. Das ganze kumuliert dann letztendlich entweder im Start, oder dass man am Boden bleibt.

6. Das bedeutet dann, dass die Entscheidung für einen Einsatz nach eigenem Ermessen getroffen wird?

Ja. Das ist die Entscheidung des Piloten, dass er anhand von Kriterien sagt „Jetzt wird ein Einsatz erforderlich“. Und Hagel hängt von mehreren Faktoren ab. Wenn es sehr trocken ist, wird es keinen Hagel geben, weil die Feuchtigkeit nicht da ist, die diese Gewitterwolke braucht.

Wenn es sehr dicke Inversionsschichten in der Atmosphäre gibt, wird die gesamte Wolkendynamik gebremst. Liegen diese Inversionsschichten bei ca. 6 km, werden die Wolken auch nicht höher, als 5-6 km. Aber aus 5 bis 6 km hohen Wolken gibt es keinen Hagel. Dazu braucht man mindestens 8 km.

Ab 8 km wird es interessant. Da werden dann die ersten Graupelkörner und kleinere Hagelkörner gebildet und wenn man dann auf 9, 10, 11, 12 km kommt, im Sommer bis zu 15 km, dann wird es natürlich extrem. Wenn dann noch genügend Feuchtigkeit da ist, dass dieser Prozess sehr dynamisch abläuft. Oder wenn die Aufwinde in diesen Wolken sehr stark sind, also sehr viel Bewegung nach oben stattfindet, dann können die Hagelkörner sehr groß werden.

7. Die Landschaft im Alpenvorland ist wahrscheinlich schon förderlich zur Hagelbildung?

Ja. Die Bildung eines Gewitters hängt auch sehr stark von der Orographie ab. Wenn ich entsprechende Geländeformationen habe, wo der Wind dann drüber weht und zum Aufsteigen gezwungen ist, dann ist das schon prädestiniert für Gewitter.

Wenn man sich eine Gewitterkarte von Europa anschaut, quer über die Landschaft, wo der Deutsche Wetterdienst seine ganzen Daten ab einer bestimmten Intensität darstellt. Dann verlaufen diese dunklen Flecken, diese Konzentrationen, immer im Bereich der Alpen. Also um die Alpen oder um die Pyrenäen oder runter bis nach Griechenland. Überall dort wo Staueffekte stattfinden.

Es gibt manchmal Situationen bei der Schwäbischen Alp, da stehen dann die Gewitter, ein Turm neben dem anderen, wie eine Perlenkette.

8. Wird Hagel im Alpenvorland auch dadurch befördert, dass es in dieser Region so viele Seen gibt?

Seen und Mooregebiete vor allem, dort wo viel Feuchtigkeit verdunsten kann. Das ist immer abhängig von der Situation und der Umgebung. Im Frühjahr wirken diese Seen als Wasserspeicher, allerdings ist die Temperatur noch wesentlich kühler als das Land. Das Land hat sich kurzfristig erwärmt durch die Sonneneinstrahlung. Das Wasser braucht länger. Und in dieser Situation wirkt diese kalte Wasserfläche eher dämpfend. Im Laufe des Sommers gleicht sich das an. Und im Frühherbst oder Spätsommer habe ich eigentlich die gegenteilige Situation. Dass das Wasser noch wärmer ist und mehr Wärme, mehr Labilität erzeugt als das Land. Gerade über dem Wasser intensivieren sich dann Gewittersysteme dann nochmal. Letztendlich braucht man aber schon größere Wasserflächen, z.B. in der Größe des Chiemsees. Kleinere Seen haben keinen Effekt.

9. Von wo auf Impfen Sie die Wolke mit ihrem Flugzeug ? Fliegen Sie in den Aufwindbereich, oder impfen sie die Wolke von oben?

Nein, von oben schaffen wir das nicht mit unseren Flugzeugen. Da bräuchte man Maschinen, die innerhalb kürzester Zeit auf 7 bis 8 km aufsteigen können. Wir impfen nur an der Basis, im Aufwindbereich, und zwar vorgelagert an die entsprechenden Gewitterzellen.

10. Wie hoch sind die Schäden, die Hagelschläge jährlich in der Landwirtschaft verursacht?

Da empfiehlt sich wahrscheinlich die Homepage der Münchener Rück oder eine andere Schadensversicherung. Es ist schwierig das zu erfassen. Viele Schäden sind gar nicht versichert. Also die Versicherer können ja auch nur den Schaden des Versicherten benennen und gesammelt wird sowas in der Regel bei der Münchner Rück, weil da alle Versicherungen rückversichert sind.

11.1994 wurde der Verein zur Erforschung der Hagelabwehr in Rosenheim gegründet. Sind viele der Mitglieder Landwirte, die dies auch, als eine Investitionsmöglichkeit zur Schadensabwehr gegen Hagel sehen.

Ja viele unserer Mitglieder sind Landwirte, aber nicht nur. Die Anzahl der Landwirte ist nicht untergeordnet, aber wir haben auch viele Mitglieder aus dem Bereich der Hausbesitzer haben, Personen, die einen Garten haben, die in einem Obst- und Gartenbauverein organisiert sind. Also sehr viele Obst- und Gartenbauvereine sind Mitglieder bei uns und auch die Personen in diesen Vereinen haben wiederum Einzelmitgliedschaften. Viele Gemeinden sind Mitglieder und unterstützen diesen Verein.

12. Wie hoch sind die Gelder, die die Hagelabwehr jährlich erhält?

Also die Kosten. Die Kosten des Betriebs der beiden Flugzeuge, inklusive der Silberjodidlösung, inklusive aller Wartungen und Versicherungen, bewegen sich die Kosten sehr stabil während der letzten paar Jahre bei 230.000 €.

Man muss für den Betrieb eines Flugzeugs für die Hagelabwehr immer die Größenordnung, wenn man es vernünftig betreiben will, 100.000 bis 150.000 € einrechnen.

Momentan kostet der Liter Silberjodidlösung 35€ und wenn man sich vorstellt so 400, 500 oder 600 l werden pro Jahr benötigt.

13. Wurde bei dem schweren Hagelunwetter am 12. Juli 1984 in München auch Cloud Seeding betrieben?

Die Hauptzelle damals ist vom Bodensee gekommen, am Alpenbogen entlang gezogen und hat sich letztendlich über München entladen. Diese Gewitterfront hat davor auch schon Hagel gebracht, allerdings nicht so viel. Also die ist komplett unterschätzt worden. Die Situation war diese, dass in 9km Höhe eine Inversionsschicht lag und die hat das ganze System gedämpft. Über München ist die Inversionsschicht, auf Grund der Wärme der Stadt, instabil gewesen. Als das Gewitter dann über München gezogen ist, hat es sozusagen „den Deckel aufgemacht“ und die Gewitterzelle ist auf 14 bis 15 km angewachsen und hat entsprechend großen Hagel gebracht. Die Gewitterfront ist dann erst am nächsten Tag im Wiener Becken zerfallen. Sie hat mehr als einen Tag gelebt, was recht selten ist, dass Gewitterzüge eine so lange

Lebensdauer besitzen. Manchmal zerfallen Gewitterzellen schon nach einer halben Stunde. Aber es kommt immer darauf an, ob man es mit Einzelzellen, mit Multizellen oder mit Superzellen zu tun hat. Und das war mit Sicherheit eine Superzelle, die entsprechende Ausmaße hatte und damit natürlich auch entsprechendes Potenzial.

Cloud Seeding hätte man schon noch betreiben können. Aber um diese Zelle sinnvoll zu impfen, im Nachhinein gesehen, hätte man schon beim Bodensee anfangen müssen.

Später haben sich in der Nacht noch Tochterzellen gebildet, die auch im Rosenheimer Gebiet kleinräumig Hagel gebracht haben. Aber wir fliegen halt nur bis Sonnenuntergang.

Es gibt Leute in der Steiermark, die nachts zum Wolkenimpfen fliegen. Wie sie es genau machen, entzieht sich mir, weil ich der Ansicht bin, wenn man es richtig machen will, die Basis sehen muss, die Wolken sehen muss, die Wolkenveränderung sehen muss und in der Nacht habe ich da keine Chance. Und man kann nicht nur nach dem Radarbild gehen.

14. Warum wurde Hagelschießen im Jahr 1933 verboten?

Dass es verboten wurde, weiß ich nicht. Kann ich mir aber gut vorstellen.

Damals hat man wahrscheinlich etwas anderes dahinter gesehen, wenn jemand mit Raketen rumgespielt hat. Aber da müsste ich jetzt spekulieren.

15. Hagelschießen wird bereits seit einer geraumen Weile in Bayern betrieben. Aber wann begann man Silberjodid einzusetzen?

Beim Hagelschießen da weiß man auch wieder nicht genau was besser gewirkt hat. Der Pulverdampf, der Rauch, diese Partikel, die man damit in die Atmosphäre gebracht hat, oder die Schallwellen.

Also ich würde sagen der Rauch hat letztendlich die besseren Wirkungen gehabt.

16. Silberjodid wurde hier ja bereits in den 30ern eingesetzt. Die Experimente von Schaefer und Vonnegut, welche die Wirksamkeit des Silberjodids für die Eiskeimbildung bestätigten, fanden aber erst in den 50ern statt. Wusste man bereits davor von der Wirksamkeit, oder war dies zufällig?

Ich glaube, dass das eher zufällig war. Also man hat schon damals versucht Stoffe zu finden mit denen man Wolken beeinflussen kann. Und Hintergrund, wie in vielen Dingen, war was Militärisches. Um Bomben zielsicher abzuwerfen, braucht man freie Sicht auf das Zielfeld und wenn Wolken davor waren, dann war das natürlich schlecht. Und deshalb hat man zum Teil im Vorfeld pyrotechnische Materialien abgeworfen, die letztendlich den Zweck hatten den Nebel oder die Wolken aufzulösen. Das hat man schon während dem zweiten Weltkrieg versucht.

Die Experimente in New York hatten somit eher den Zweck wissenschaftlich nachweisen zu können, dass Silberjodid wirksam ist.

17. In welchem Verhältnis müssen Aceton und Silberjodid gemischt werden?

Also wir verwenden keine Leuchtfackeln, sondern nur die flüssige Silberjodid-Aceton Lösung, die wir in Brennern haben. Die wird dann bei sehr hoher Temperatur verbrannt, irgendwo knapp unter 1000°C . Da streiten sich auch die Gelehrten. Die einen sagen es muss genau 1148°C sein, die anderen sagen 800°C reicht locker. Also da gibt es unterschiedliche Aussagen bei welcher Temperatur man das Silberjodid verbrennen muss, damit die optimalen Teilchen entstehen. Genauso gibt es Uneinigkeit bei der Konzentration des Silberjodids, ob es nun 3%, 2% , 5% oder 6% Lösung sein soll. Welche Zusatzstoffe hinzugefügt werden sollen, damit man schnellerer Reaktionen erreicht, damit diese Partikel möglichst hygroskopisch sind. Da ist man sich nicht einig, was da am besten ist. Und das wäre mein Ziel für die nächsten Jahre, dass man mit einer Universität zusammen misst, wir haben einen Generator neu entwickelt , der sehr gut regelbar ist, was kommt an Partikelkonzentration hinten aus dem Generator raus. Wir wissen, dass Partikel rauskommen, aber sind diese Partikel auch geeignet das zu tun was wir wollen. In der Atmosphäre gibt es ja eine ganze Menge von Partikeln, die auch geeignet wären, aber es gibt noch viel mehr, die nicht geeignet sind. Das Problem ist immer möglichst gute Partikel, „gut“ im Sinne von geeignet für die Wetterbeeinflussung, zu erzeugen. Die Struktur der Partikel muss entsprechend sein. Sie müssen lange genug stabil sein, damit sie eben auch wirksam werden können. Wenn die Partikel innerhalb von Sekunden zerfallen, dann habe ich nichts davon. Und wir wissen, dass Silberjodid nicht ewig lange stabil ist. Man geht davon aus, dass es 10 Minuten bis zu einer Viertelstunde maximal stabil ist. Dann zerfällt es, auf Grund der UV-Strahlung, in seine Bestandteile.

Deshalb ist auch das Seeding im Vorfeld, was manche praktizieren, nicht sonderlich effektiv.

Aber unsere Aceton-Silberjodid-Lösung kaufen wir vorgefertigt. In Aceton lassen sich maximal 5% Silberjodid und 1% Zusatzstoffe lösen. Bei den Zusatzstoffen handelt es sich um ganz normale Salze.

18. Wie viele Liter an Silberjodid verbrauchen Sie pro Einsatz, damit eine Wirkung erzielt werden kann?

Das ist unterschiedlich. Es kann durchaus sein, und da gibt es auch große Wissenslücken, dass sehr wenig Material notwendig ist, um eine sehr große Wirkung zu erzielen. Wir wissen aus einer wissenschaftlichen Untersuchung, dass wir mit unserem Material alle Wolkenbereiche erreichen können. Dass es auch im Aufwind dahin transportiert wird, wo wir es haben wollen. Wir gehen davon aus, dass die Hagelkorngröße abhängig ist von der Zahl der angebotenen Eiskeime. Und wenn ich zu wenig Material einbringe, dann schaffe ich es eben nicht, dass die Hagelkörner klein genug werden zum Schmelzen. Und daran wird man die Wirksamkeit letztendlich abschätzen können. Wir haben mit der Deutschen Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt in Oberpfaffenhofen mal ein mehrjähriges Projekt gemacht und aus der Zeit wissen wir, dass unsere Teilchen dorthin kommen, wo sie hinsollen. Ob sie ausreichend sind, das ist offen.

Im Moment haben wir pro Flugzeug zwei Generatoren. Deshalb fliegen wir auch immer mit zwei Flugzeugen, damit wir in möglichst kurzer Zeit möglichst viel Material in die Wolken ein bringen. Das Zeitfenster ist ja meistens nur 10 bis 15 Minuten. In einen Generator passen 20 l, pro Flugzeug also 40 l 6%ige Lösung. Also kommt man ungefähr auf ein Pfund reines Silberjodid. Und dieses Material können wir jetzt durch unsere neue Technik in weniger als zwei Stunden verbrennen maximal. Ich kann das ganze aber auch auf 3 ½ Stunden strecken, wenn ich das ganze zurückdrehe und weniger Material verbrenne. Es gibt Situationen, da sagt man vom Aufwind her und von der Wolkenbildung wird wohl weniger auch reichen. Wo man die maximale Leistung hernimmt, ist bei starken Aufwinden. Weil dann sehr viel Dynamik da ist und dann muss das Material möglichst schnell in diese Wolke rein und da muss dann möglichst viel auch rein. Deshalb verwenden andere Organisationen auch zusätzlich zu den Generatoren auch Fackeln. Mit einer Brenndauer von 30 s hat man nochmal die Möglichkeit sehr viele Kondensationskerne zusätzlich zu produzieren.

19. Was ist der genaue Unterschied zwischen einer Leuchtfackel und einem Generatoren

Die Generatoren sind raketenförmige Behälter, in denen diese Lösung ist, ca. 20 l pro Generator, Die Fackeln sind Stäbe unterschiedlicher Länge, ungefähr ein paar Zentimeter dick und da ist, wie beim Feuerwerkskörper Material drinnen. Und da ist Silberjodid mit eingemischt. Und die werden gezündet und brennen dann wie ein Streichholzzündkopf ab und geben sehr viel Material dabei ab.

In der kurzen Zeit auf alle Fälle mehr als die Generatoren.

Aber auch da wissen wir nicht, ob das Material, was da gebildet wird, besser oder geeigneter ist.

Ich sage wir fliegen eher auf den Mars, bevor wir wissen was genau in Gewitterwolken passiert und wie wir sie beeinflussen können.

Manche Gewitterwolken, sogenannte Multizellen, die haben einen Lebenszyklus von mehreren Stunden. Auf der einen Seite ist der Zerfall, auf der anderen Seite ist der Wachstum, wo es ständig weiter geht und zwischendrin ist die Waschtrommel in der alles abgeht und da dauert es natürlich länger. Aber es gibt natürlich auch stationäre Gewitter. Da geht es relativ schnell, da gibt es einen Regenschauer und danach ist alles vorbei.

20. Können Rückstände des Silberjodids im Boden und in Gewässern nachgewiesen werden?

Es gibt eine ganze Reihe von Untersuchungen. Aktuell gibt es in Baden Württemberg zwei und die sind letztendlich zum gleichen Ergebnis gekommen, wie viele Leute davor, dass durch Impfung keine Anreicherung im Boden stattfindet von dem Material. Wenn Sie jetzt eine Bodenprobe aus dem Landkreis Rosenheim, wo seit Jahrzehnten Hagelabwehr betrieben wird, mit einer aus Schleswig-Holstein vergleichen würden, würden Sie keinen Unterschied erkennen. Die Mengen sind so gering, dass sie keinen Effekt haben. Deshalb nimmt man auch noch nach wie vor Silberjodid, weil es als der geeignetste Stoff erscheint. Es gibt auch schon andere Materialien. Die Amerikaner arbeiten zum Teil auch mit Trockeneis. Aber das ist natürlich schwieriger auszubringen und auch schwieriger zu lagern. Und ich weiß, dass man in Russland zu Zeiten, als man kein Silberjodid hatte, Zement verwendet hat. Also da braucht man dann natürlich andere Mengen und die Auswaschung des Zements aus dem Boden ist unter Umständen schwieriger, als bei Silberjodid.

Grundsätzlich wäre es auch möglich Seeding mit Salz zu betreiben. Salzverbindungen sind ja wasseranziehend und beim Rain Enhancement geht es ja darum möglichst viele dieser

Wolkentröpfchen, man sagt ja, dass man ungefähr 4 Mio. Wolkentröpfchen braucht für einen Regentropfen, anzulagern. Die lagern sich dann an wenn eine gewisse Sättigung da ist und wenn ein Kondensationskeim vorhanden ist. Und da reicht ein Salzpartikel, da würde wahrscheinlich auch Staub reichen. Man muss eben irgendwas finden, wo sich diese Teilchen gerne anlagern. Je geeigneter dieser Stoff ist, desto größer ist mein erzielter Effekt. Wir gehen aber davon aus, dass Silberjodid für unsere Zwecke noch geeigneter ist, als Salz. Auch wenn es natürlich wesentlich teurer ist als Salz.

21. Soll das Einsatzgebiet der Rosenheimer Hagelflieger erweitert werden?

Also vor vielen Jahren hatten wir mal Anfragen aus Österreich, Cloud Seeding zu betreiben, um höheren Schneefall zu bewirken. Das haben wir dann aber abgelehnt, weil wir wollten nicht dafür verantwortlich sein wenn auf der Passstraße der Verkehr zusammenbricht, wegen dem üppigen Schneefall.

Also das Gebiet, was wir derzeit befliegen, ist groß genug für zwei Flugzeuge. Wir sind eher am überlegen, wie wir ein drittes Flugzeug beschaffen können und das im Verbund mit den Österreichischen Gemeinden betreiben können. Also es gibt einen Verein zur Hagelabwehr in den Bezirken Kufstein und Kitzbühel. Und da wollen wir versuchen, wenn sich der Verein so etabliert hat, dass er alleine bestehen kann und die entsprechenden Gelder bekommt, dass wir im Verbund ein drittes Flugzeug betreiben. Das würde dann auch drüben in Österreich stehen, aber da gibt es noch viele Hürden bis wir das erreichen.

Ansonsten bestehen derzeit keine neuen Anfragen von anderen Gemeinden. Das Problem des Hagels lässt aber nach Norden hin ganz schnell nach. Da gibt es zwar auch hin und wieder mal Gewitter mit Hagel, aber die Anzahl der Gewitter liegt, wenn ich 50 km vom Alpenrand weggehe, fast nur noch bei der Hälfte. Das nimmt dramatisch ab Richtung Norden.

22. Konnten Sie beobachten, dass Hagelschläge in letzter Zeit häufiger geworden sind?

Also es sind Verschiebungen erkennbar, im Rahmen der allgemeinen Erwärmung.

Das was man dieses Jahr bereits im Norden Deutschlands beobachten konnte, tornadoartige Stürme um diese Jahreszeit.

Aber anhand meiner Einsatzzahlen muss ich sagen, nein. Die Einsatztage und Einsatzzeiten für die Hagelabwehr sind gleich geblieben. Was man aber feststellen kann, ist eine Verschiebung ins Frühjahr. Die Gewitter sind bereits im April in einer Größenordnung, dass

sie Hagel bilden können. Uns fehlt die Übergangszeit. Wir haben noch Schnee in den Bergen und am nächsten Tag schon 28°C. Hat man ja heuer ganz deutlich gesehen, wie schnell das geht. Das bewirkt natürlich eine entsprechende Dynamik. Was dazu kommt. Wir haben natürlich sehr viel Wasser in der Atmosphäre. Früher lag das in Form von Eis an den Polkappen vor. Das schmilzt jetzt und viel von diesem Wasser ist jetzt in der Atmosphäre in Form von Wasserdampf. Und das erleben viele Leute jetzt bei diesen ersten Regengüssen, dass so viel Niederschlag fällt, dass die Entsorgungssysteme alle überlastet sind. Und das wird in Zukunft noch zunehmen, dass kurzfristige Niederschläge so extrem sind, dass alles unter Wasser steht. Das liegt eben auch daran, dass mehr Feuchtigkeit in der Atmosphäre ist. Mit dieser zunehmenden Feuchtigkeit werden diese Gewitter auch aggressiver werden. Sie entstehen viel schneller, die Labilität ist größer, die Abläufe sind rasanter und in der Hinsicht natürlich auch die Auswirkungen.

23. Denken Sie, dass in Zukunft häufiger Einsätze zur Hagelabwehr geflogen werden müssen?

Ob, auf Grund des Klimawandels, in Zukunft häufiger geflogen werden muss, das weiß ich nicht. Die Zahlen sprechen im Moment nicht dafür.

Es ist auch schwierig eine Prognose zum Hagel zu machen. Es gibt dafür nicht genügend Fallzahlen. Wenn man sowas betrachtet, dann muss man Zeiträume von Jahrzehnten betrachten und da ist es natürlich schwierig erstmal die Daten so hinzukriegen, dass man sagen kann, das sind vergleichbare Daten. Was früher gemessen wurde, was heute gemessen wird. Zum Beispiel Versicherungszahlen kann man eigentlich in die Tonne treten, weil sich ja die Bebauung und die Kulturen geändert haben im Laufe der Zeit. Und zwar sich von Jahr zu Jahr und Region zu Region ändern. Von daher ist es äußerst schwierig das mit Versicherungszahlen zu untermauern.

24. Würden Sie sagen Cloud Seeding ist eine effiziente Methode

Es ist immer dann effizient, wenn man zur richtigen Zeit an der richtigen Stelle Impfmateriale in die Wolken einbringen kann. Darauf kommt es an.

Wissenschaftlich nachweisen lässt sich die Effizienz schon. Die Wissenschaft würde einen voll-randomisierten Versuch akzeptieren. Das heißt nach ganz bestimmten Kriterien werden

die Wolken befliegen und der Pilot weiß nicht ob er nur Aceton verbrennt, oder ob auch Silberjodid dabei ist. Und man wertet aus was kommt am Boden an und der einzige der das bisher ansatzweise gemacht hat, auch wenn der Ziel und Vergleichsgebiet nebeneinander hatte, war der Dr. Syvavik. Der hat das über mehrere Jahrzehnte gemacht und das ist bisher auch die einzige Auswertung, die auch misst was am Boden ankommt. Die DLR hat damals nur Radartechnik genommen und hat gemessen was passiert in der Wolke. Und wenn ich über die Eisphase gehe und das Radar Eis erkennt, aber nicht unterscheiden kann sind es viele kleine oder wenige große Hagelkörner, dann bildet man natürlich Eis und unterstützt die Hagelbildung, dahingehend, dass viele kleine Hagelkörner entstehen. Aber am Boden hat man das dann nicht verifiziert, was kommt denn unten an aus diesen Wolken.

25. Das dynamische Cloud Seeding funktioniert ja auch dahingehend, dass man große Mengen an Silberjodid in Wolken einbringt, um vertikale Luftbewegungen zu verstärken. Bodenmessungen konnten diese Methode bisher jedoch auch nicht bestätigen

Von der Theorie her ist das bedenklich und funktioniert wahrscheinlich gar nicht so. Wenn ich nämlich frühzeitig impfe und eine wachsende Cumulus Wolke bereits impfe, so impfen kann, dass sie Regen bildet. Dann werden die Regentropfen so schwer, dass der Aufwind nicht reicht um sie weiter nach oben zu transportieren. Das ist ein Effekt der frühzeitigen Impfung, dass ich versuche das System schon zu dämpfen indem ich einen Teil des Wassers der Wolke schon frühzeitig entziehe in Form von Regen, der dann für die weitere Bildung der Hagelwolke nicht mehr zur Verfügung steht. Man nennt das „die Erniedrigung der Trajektorien“. Weil diese Teilchen einfach schwerer sind, werden sie nicht so weit nach oben gerissen. Der Aufwind ist dafür nicht stark genug und die fallen dann letztendlich schon als Regen raus bevor sie überhaupt für die Wolke wirksam werden.

2003 haben wir das sehr deutlich gesehen, das war dieser sehr heiße Sommer, und da gab es viele Gewitter, aber keinen Hagel und auch wenig Niederschlag. Der Regen ist auf dem Weg nach unten bereits verdampft, bevor er den Boden erreicht hat. Und da hat man es sehr deutlich gesehen. In dem Moment, wo man diese Wolken geimpft hat, waren dann sofort Regentropfen dabei, die waren dann aber auch sofort wieder weg. Die Basis der Wolken war aber damals auch sehr hoch. Und wir wissen, dass Gewitterzellen, deren Basis auf 3000 m liegt, Hagel bilden können, aber dieser Hagel nie am Boden ankommt. Also diese Wolken interessieren uns nicht.

26. Sie arbeiten zusammen mit der FH Rosenheim an dem Projekt RO-BERTA 2 zur Verbesserung der Hagelabwehr. Was waren die bisher gewonnenen Erkenntnisse ?

Wir befassen uns derzeit mit dem Projekt RO-BERTA 3. RO-BERTA 2 ist schon abgeschlossen. Der Professor Zentgraf hat bereits Vorschläge für das neue Projekt unterbreitet, aber wir arbeiten noch an der Finanzierung. Letztendlich geht es darum die bisherigen Studien fortzuführen und wir brauchen einiges an neuer Hardware. Die EDV ist einfach sehr alterungsanfällig und da müssen wir noch ausbessern. Das zweite Flugzeug muss noch ausgerüstet werden. Dann wollen wir die Datenverbindung nochmal verbessern, wir arbeiten derzeit mit einer LED in Rosenheim die auf der Hochschule steht. Ziel ist es diese Daten per Richtfunkstrecke zum Hochfelln zu bringen, also zu einem höheren Standort, um das Flugzeug besser zu erreichen. Wenn wir es am Berg oben haben dann erreiche ich das Flugzeug praktisch schon am Boden. Dann bekommt der Pilot schon am Boden diese Radardaten übermittelt. Jetzt muss er die entsprechende Höhe haben, damit er die Daten von der Hochschul Antenne empfangen kann. Da muss man schon ein paar hundert Meter in der Luft sein, bevor man da eine Verbindung hat. Und je weiter ich mich von der Antenne entferne, desto schwieriger wird das und umso höher muss man fliegen. Und wenn ich im Traunsteiner Gebiet fliege muss man schon fast auf 1000 m sein, damit ich noch Empfang habe zur Antenne. Und diese Dinge, genauso wie mit Abschattung im Bergland, wollen wir damit weitestgehend eliminieren. Dass wir eben die Antenne weiter nach oben bringen. Und letztendlich auch das Ziel wäre, dass der Nutzer von Roberta auch Bilder aus der Luft bekommt. Also es gibt ja schon welche, aber die sind eben noch sehr einfach und sehr schlecht aufgelöst. Da wollen wir auch besser werden. Das hängt einfach mit der Datenmenge zusammen, die da durchkommt. Das ist eine bidirektionale Verbindung und Priorität haben natürlich die Radardaten. Und alles was wir an Kapazität dann noch frei haben, da steckt dann die Intelligenz dahinter und wenn man da noch Kapazität gewinnen kann, nutzen wir sie dann für solche Dinge. Unser zuerst angepeiltes Ziel wären Videos gewesen. Aber für Videos braucht man eine so große Bandbreite, das werden wir wahrscheinlich nicht schaffen.

27. Dann bedanke ich mich vielmals dafür, dass Sie sich heute die Zeit genommen haben für meine Fragen.