

Schadenmodellierung extremer Hagelereignisse in Deutschland

Diplomarbeit im Fachbereich Geowissenschaften

Institut für Landschaftsökologie

der

Westfälischen Wilhelms-Universität Münster

vorgelegt von

Jan Deepen

Juli 2006

1. Gutachter: Prof. Dr. Otto Klemm

2. Gutachter: Dipl. Meteorologe Stefan Beine

Zusammenfassung

Schwere Hagelstürme können beträchtliche Schäden an Kraftfahrzeugen verursachen. In Anbetracht des starken Wachstums von urbanen Ballungszentren und verstärkter Wertekonzentration stellen extreme Hagelereignisse ein immer größer werdendes Schadenpotenzial für Versicherungsunternehmen dar. Probabilistische Naturkatastrophenmodelle finden seit einigen Jahren verstärkt in der Versicherungswirtschaft Anwendung, um potenzielle Risiken besser abzuschätzen. Mit dem in dieser Arbeit vorgestellten Schadenmodell können durch Hagel verursachte Schäden an Kraftfahrzeuge simuliert werden.

Das Hagelschadenmodell basiert auf einer umfassenden naturwissenschaftlichen Untersuchung der relevanten Parameter, die ausführlich beschrieben werden. Der strukturelle Aufbau des Modells setzt sich aus vier Hauptkomponenten zusammen:

Im Naturgefahrenmodul (1) werden mit Hilfe historischer Daten diejenigen Parameter, die ein Hagelereignis charakterisieren, zusammengetragen. Aus diesen wird ein synthetischer Hagelereigniskatalog erstellt, mit dem eine große Anzahl potenziell möglicher Schadenereignisse simuliert wird. Jedes Hagelereignis enthält Angaben über die geographische Lage, Länge, Breite, Ausdehnung und Zugrichtung. In der Werteverteilungskomponente (2) werden der Standort der exponierten Kraftfahrzeuge sowie zusätzliche Informationen wie Versicherungsbedingungen abgelegt. Um das Ausmaß des Schadens zu berechnen, muss eine Beziehung zwischen dem Verhalten des Kraftfahrzeugs beim Aufschlag der Hagelkörner auf die Karosserie sowie der Intensität des Hagelereignisses hergestellt werden. Dies geschieht im Modul der Schadenempfindlichkeit (3). Im letzten Teil der Schadenmodellierung werden die vorherigen Module kombiniert (4). Mit der Berechnung der Schäden und der Zuweisung von Wiederkehrperioden können versicherungstechnisch wichtige Ausgabegrößen wie Schadenfrequenzkurven oder jährliche Schadenerwartungen erstellt werden.

Die Funktionsweise des Modells wird anhand von zwei Testdurchläufen erklärt. Zum einen wird als Portfolio der totale zum anderen der versicherte Personenkraftwagenbestand in Deutschland verwendet. Die Ergebnisse werden diskutiert und auf ihren Einfluss auf die Entscheidungen eines Versicherungsunternehmens untersucht. Diese unterliegen aufgrund der hohen

Variabilität der Parameter gewissen Unsicherheiten, deren Bedeutung bei der Einschätzung der Ergebnisse erläutert wird.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Zielsetzung	2
1.2	Rückversicherung und die Bedeutung der Modellierung von Naturkatastrophen in der Versicherungswirtschaft.....	4
1.3	Geschichtlicher Hintergrund der Hagelforschung, ihrer Messinstrumente und Modellierung.....	6
2	Material.....	10
2.1	Software	10
2.2	Versicherungsdaten	11
2.3	Kraftfahrzeugdaten	13
2.4	Corine Land Cover Daten	15
3	Funktionsweise des Hagelschadenmodells.....	18
3.1	Die Naturgefahr Hagel.....	20
3.1.1	Die Entwicklung von Hagel in konvektiven Sturmsystemen	20
3.1.2	Die Hagelintensität	25
3.1.3	Über die Intensität und Ausdehnung von Hagelstrichen und Hagelzügen.....	29
3.1.4	Räumliche Variabilität von Hagelereignissen	37
3.1.5	Zugrichtung von Hagelgewittern.....	42
3.1.6	Zeitliche Variabilität.....	43
3.1.6.1	Jährliche Hagelvariabilität.....	44
3.1.6.2	Saisonale Hagelvariabilität.....	46
3.1.6.3	Täglicher Gang der Hagelhäufigkeit.....	48
3.1.6.4	Dauer eines Hagelfalls	49
3.1.6.5	Die Bedeutung der zeitlichen Variabilität bei der	
	Modellierung.....	50
3.1.7	Generierung eines Hagelereigniskatalogs.....	52
3.2	Die Werteverteilung.....	56
3.3	Die Schadenempfindlichkeit.....	58
3.4	Die Schadenberechnung	61
4	Schlussfolgerungen und Ausblick.....	69
5	Literatur.....	73
6	Dank	78
7	Anhang	79

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Häufigkeitsverteilung der Hageltage in Deutschland	
pro Jahr (Quelle: MÜNCHENER RÜCK, 1997)	13
Abbildung 2: Totaler Bestand an Personenkraftwagen in Deutschland	15
Abbildung 3: Bebaute Flächen nach der Corine Land Cover Klassifizierung ..	17
Abbildung 4: 4-Komponenten-Naturgefahrenmodell	18
Abbildung 5: 3-D Modell eines konvektiven Sturmsystems (Quelle: SCHIESSER, 1988)	23
Abbildung 6: Vertikalschnitt durch ein hagelproduzierendes System (Quelle: SCHIESSER, 1988)	23
Abbildung 7: Theoretische Beziehungen zwischen der kinetischen Energie, der Aufschlaggeschwindigkeit der Hagelkörner und dem Hagelkorndurchmesser (LEIGH, 1998)	28
Abbildung 8: Hagelgewitter am 26. Mai 1985 in England; Die Isolinien stellen den maximal nachgewiesenen Hagelkorndurchmesser dar (Quelle: WEBB et al., 2001)	30
Abbildung 9: Übersichtskarte der Schweiz (oben links) mit dem Standort des Radars (Kreuz), dem Erfassungsgebiet des Radars (Kreise) und dem vergrößert dargestellten Kartenausschnitt (Rechteck). Die in der Box dargestellte kinetische Energie wird in grau schattierten Farben wiedergegeben, die Anzahl der beschädigten Kraftfahrzeuge ist an der Größe der Kreise zu erkennen (Quelle: HOHL, 2001)	31
Abbildung 10: Große Hagelzüge während des Münchener Hagelunwetters vom 12. Juli 1984 (verändert nach: DEUTSCHER WETTERDIENST)	33
Abbildung 11: Hagelgefährdung in Mitteleuropa (Quelle: SWISS RE)	38
Abbildung 12: Mittlere Zugrichtungen in Bayern (Quelle: KLEINSCHROTH, 1999)	43
Abbildung 13: Jährliche Anzahl der Hageltage in Deutschland von 1934-1984 (verändert nach: MÜNCHENER RÜCK, 1984)	44
Abbildung 14: Zeitreihen der jährlichen Anzahl der Hageltage in verschiedenen Gebieten und Ländern Europas: Friuli Venezia Giulia in Italien, Trentino in Italien, Styria in Österreich, Griechenland, Bulgarien, Britische Inseln und Irland, Frankreich und Spanien (Quelle: GIAIOTTI et al., 2003)	45
Abbildung 15: Prozentuale Verteilung der durchschnittlichen monatlichen Hagelhäufigkeit in Deutschland basierend auf 413 Hagelmeldungen mit Hagel > 20 mm oder Hagel beliebiger Größe, der zusammen mit Windschäden aufgetreten ist (Quelle: www.tordach.org)	46
Abbildung 16: Monatliche Verteilung der Hageltage in New South Wales, Australien (Quelle: McMASTER, 2001)	47
Abbildung 17: Tägliche Periode der Hagelhäufigkeit in Deutschland (Quelle: www.tordach.org)	49
Abbildung 18: Prozess der Hagelereignisgenerierung	53
Abbildung 19: Darstellung von einhundert simulierten Hagelereignissen in Deutschland unterlegt mit dem totalen PKW-Bestand (vgl. Abb. 2). Der vergrößerte Bildausschnitt oben rechts zeigt	

den Aufbau eines simulierten Hagelereignisses mit Kern- und Randzone.....	55
Abbildung 20: Schadenempfindlichkeitskurve	60
Abbildung 21: Schadenfrequenzkurve des versicherten PKW-Bestandes	65
Abbildung 22: Ereignisschäden und totale Schäden des versicherten PKW- Bestandes zu ausgewählten Wiederkehrperioden.....	67
Abbildung 23: Schadenfrequenzkurve des totalen PKW-Bestandes	68
Abbildung 24: Ereignisschäden und totale Schäden des totalen PKW-Bestandes zu ausgewählten Wiederkehrperioden.....	68

1 Einleitung

Extremereignisse erwecken in der Öffentlichkeit immer großes Interesse, gerade weil sie so außergewöhnlich sind und nicht jeden Tag auftreten. Die Medien erwähnen in diesem Zusammenhang häufig Begriffe wie „Jahrhunderthochwasser“ oder „Jahrtausendsommer“, und nicht unbedingt muss es sich dabei um ein Ereignis handeln, das auch alle hundert bzw. tausend Jahre vorkommt. Andererseits treten Extremereignisse in Deutschland regelmäßig auf. Und auch wenn Deutschland im Vergleich zu vielen anderen Regionen dieser Welt von Naturgefahren verschont bleibt – Erdbeben von hoher Intensität oder aktive Vulkane gibt es nicht und Hitze- und Kältewellen, Dürren, Niederschläge, Schneestürme und Tornados treten nur in abgeschwächter Form und geringer Anzahl auf – so führt jedes stärkere Naturereignis aufgrund der hohen Besiedlungsdichte und großen volkswirtschaftlichen Wertekonzentration auch zu einem Schadenereignis. Schwere Winterstürme wie „Lothar und Martin“ 1999, „Jeanette“ 2002 oder schwere Überschwemmungen wie das Pfingsthochwasser von 1999 und das Hochwasser von Elbe und Donau 2002 verursachten in den letzten Jahren Schäden in Milliardenhöhe. Die rapide zunehmende Schadenbelastung bereitet der Versicherungswirtschaft verstärkt Sorgen. So sind in den letzten vier Jahrzehnten die Häufigkeit großer Naturkatastrophen auf das Dreifache, die volkswirtschaftlichen Schäden auf das Neunfache und die versicherten Schäden sogar auf das Sechzehnfache gestiegen (MÜNCHENER RÜCK, 1999). Doch wer spricht in diesen naturkatastrophenreichen Zeiten von extremen Hagelereignissen?

Das von dieser Naturgefahr ausgehende Risiko wird in der Regel stark unterschätzt. Dabei stellt es in Deutschland das drittgrößte Schadenpotenzial – nach Winterstürmen und Überschwemmungen – dar. Etwa 15 % der volkswirtschaftlichen Schäden (20 % der versicherten Schäden) aus Naturkatastrophen von 1970-1998 resultieren aus schweren Hagelereignissen (MÜNCHENER RÜCK, 1999). Die anteilmäßig größten Schäden durch Hagelschläge verzeichnet hierbei die Landwirtschaft, denn bereits bei Hagelkörnern mit geringem Durchmesser von 5-10 mm, wie sie in lokalen Wärmegewittern häufig auftreten, verursachen an Pflanzen ertragsmindernde Schäden. Extreme Hagelereignisse mit großen Sturmflächen und hoher Intensität bilden sich dagegen nur bei bestimmten

Großwetterlagen in konvektiven Sturmsystemen, in denen Hagelkörner Durchmesser bis zu 100 mm erreichen können. Ein solch extremer Hagelschlag ereignete sich am 12. Juli 1984 in Südbayern und richtete einen volkswirtschaftlichen Schaden von über 1,5 Mrd. EUR an. An vielen Orten gingen hühnereigroße Hagelkörner nieder. Bei großen Hagelkörnern (>20 mm im Durchmesser) steigt der Schaden an Kraftfahrzeugen stark an (HOHL et al., 2002), so dass 230.000 Autos und 70.000 Gebäude beschädigt wurden (SWISS RE, 2005). 450 Mio. EUR an Versicherungsschaden entfielen auf Kraftfahrzeuge, Gebäude- und Hausratsversicherung hatten einen Schaden von 200 Mio. EUR zu tragen. „Hagelereignisse mit der meteorologischen Intensität des Münchner Hagelsturms treten über Mitteleuropa alle paar Jahre auf“ (SWISS RE, 2005). Dass dann eine Großstadt wie München getroffen wird, passiert nur selten. Es veranschaulicht jedoch, dass extreme Hagelereignisse, wenn sie über Ballungsräume mit hohen Akkumulationen von Werten ziehen, sehr hohe Schäden bewirken und diese aufgrund der gestiegenen wirtschaftlichen Verhältnisse in Deutschland noch weitaus höher sein können. So rechnet die Swiss Re bei einem 250-jährigen Ereignis in Europa bei gegen Hagel versicherten Gebäude- und Motorkaskowerten mit einem Versicherungsschaden von über 3 Mrd. EUR. Bei diesen großen Schadenssummen kann es durchaus vorkommen, dass insbesondere regionale Versicherungsunternehmen nicht über die nötigen Kapitalrücklagen verfügen und in finanzielle Nöte geraten. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit, versicherungsrelevante Schadenpotenziale aus extremen Hagelereignissen bestmöglich abzuschätzen.

1.1 Zielsetzung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung eines probabilistischen Hagelschadenmodells, das es erlaubt, Schäden an Kraftfahrzeugen, verursacht durch extreme Hagelereignisse in Deutschland, abzuschätzen. Mit Hilfe des Hagelschadenmodells können Versicherungsbestände von Versicherungsunternehmen auf ihre Risikoexponierung gegenüber der Naturgefahr Hagel untersucht werden und gestützt auf die Ergebnisse der Analyse eine kompetente Beratung des Versicherungsunternehmens für ein verbessertes

Risikomanagement vorgenommen werden. Wichtige Ausgabegrößen wie die jährliche Schadenerwartung, das maximale Schadenpotenzial und Wiederkehrperioden werden im Hagelschadenmodell berechnet und stellen für Versicherungsunternehmen wichtige Kenngrößen bei der Gestaltung ihrer Prämien und bei der Entscheidung, ob und in welcher Form eine Rückversicherungsdeckung nötig ist, dar.

Detaillierte und veröffentlichte Literatur über die Gestaltung von Naturkatastrophenmodellen ist rar. Basisinformation bieten lediglich große Modellierungsfirmen, die kommerzielle Modelle auf dem freien Markt anbieten, sowie Rückversicherungsunternehmen und Rückversicherungsmakler, die häufig ihre eigenen, internen Modelle entwickeln. Während die Entwicklung dieser Modelle viel Zeit und große Anstrengungen erfordert, wird weit weniger dafür getan, Modellannahmen und –resultate zu veröffentlichen und zu diskutieren. Daraus resultieren verschiedene Modellansätze, die unterschiedliche Ergebnisse erzeugen. Dies kann schwerwiegende Folgen für die Gesellschaft haben, da die Ergebnisse bei falscher Anwendung im Naturkatastrophenmanagement verheerende Folgen nach sich ziehen können.

Den Prozessen und der Struktur der Naturkatastrophenmodellierung wird in der Arbeit eine zentrale Position zugemessen. Viele Naturkatastrophenmodelle beruhen auf einer bekannten theoretischen Modellstruktur, die für dieses Hagelschadenmodell ebenfalls angewendet wurde. Das Hagelschadenmodell beinhaltet eine Vielzahl von Parametern, die in ihrer Gesamtheit ein extremes Hagelereignis bestmöglich beschreiben sollen. Neben einer ausführlichen naturwissenschaftlichen Darstellung des Naturphänomens Hagel stellt die Implementierung der verwendeten Parameter in das Hagelschadenmodell einen Schwerpunkt der Arbeit dar.

Mit dieser Arbeit werden zwei Ziele verfolgt: Zum einen soll das Hagelschadenmodell Anwendung finden bei der Risikoberatung von Versicherungsunternehmen, zum anderen einen wichtigen Beitrag leisten, mit den hier vorgestellten Ideen und Annahmen die öffentliche Diskussion um das Thema Naturkatastrophenmodellierung zu fördern.

Bevor das Hagelschadenmodell präsentiert wird, soll der Leser mit der wichtigsten Fachterminologie der Naturkatastrophenmodellierung bekannt gemacht werden.

1.2 Rückversicherung und die Bedeutung der Modellierung von Naturkatastrophen in der Versicherungswirtschaft

Trotz enormer Errungenschaften in Wissenschaft und Technik bleiben Naturkatastrophen immer noch unvorhersehbare und unkalkulierbare Ereignisse.

Zu einem umfassenden Risikomanagement gehört die Aufgabe der Versicherungsunternehmen im Falle einer Naturkatastrophe die Schadenbewältigung zu übernehmen. Das Versicherungsunternehmen steht in der Verantwortung, dass die von den Versicherten eingezahlten Prämien zum Ausgleich der Schäden ausreichen. Daher ist es für ein Versicherungsunternehmen von entscheidender Bedeutung, den **jährlich zu erwartenden Schaden** abzuschätzen, sowohl für einzelne Versicherungsobjekte als auch für ganze Versicherungsbestände (**Portfolios**), um einen Parameter für die Berechnung der Prämien für die Versicherten zu erhalten.

Eine wichtige Kenngröße ist das Ausmaß **extremer Ereignisschäden**. Dadurch bringt eine Versicherung in Erfahrung, ob ihre finanziellen Kapazitäten zur Deckung der Schäden bei einem extremen Ereignis auch ausreichen werden. Ist das übernommene Risiko zu hoch oder möchte der Erstversicherer aus einem anderen Grund das Risiko nicht voll tragen, so kann er sich bei einer Rückversicherung versichern. Nach der Definition von GROSSMANN (1982) ist eine Rückversicherung die Überwälzung eines Teils der von einem Erstversicherer gegenüber Versicherungsnehmern aufgrund von Versicherungsverträgen oder von gesetzlichen Bestimmungen übernommenen Gefahren oder Risiken auf einen zweiten, mit dem Versicherungsnehmer nicht direkt in Verbindung stehenden Versicherungsträger, den Rückversicherer. Kurz: eine Rückversicherung ist die Versicherung der Versicherer. Durch eine Rückversicherung schützt sich der Erstversicherer vor Spitzenrisiken und vermindert dadurch seine Ruinwahrscheinlichkeit.

Um im Schadenfall der Verpflichtung der Schadenbewältigung nachzukommen, muss das Risiko von Naturkatastrophen also so präzise wie möglich abgeschätzt werden. Doch gerade wenn sich Naturkatastrophen über längere Zeiträume nicht ereignet haben, wird die von ihr potenziell ausgehende Gefahr stark unterschätzt. Zudem gestaltet sich gerade bei Naturgefahren wie Erdbeben, Sturm, Überschwemmung und Hagel, die aufgrund der großen Anzahl gleichzeitig

betroffener Versicherungspolicen ein sehr hohes Schadenpotenzial aufweisen, die Abschätzung extremer Ereignisschäden sehr schwierig – man spricht von einem **Katastrophenkumul.** Selbst bei geringen Durchschnittsschäden kumulieren sich viele betroffene Policen zu einem Großschaden.

Naturgefahrenmodelle können dabei als ein wichtiges Instrument zur Abschätzung der aus Naturgefahren resultierenden Gefährdung dienen. Mit ihnen können die Portfolios der Versicherungen analysiert werden, um so die jährliche Schadenlast zu berechnen. Nach KILLMIER (2005) gibt es zwei typische Naturkatastrophenmodelle: deterministische und probabilistische:

Deterministische Modelle bieten eine einfache Möglichkeit, historische Naturkatastrophen über heutige Portfolios zu simulieren, um ihre heutigen Schäden zu berechnen (so genannte As-If-Analysen). Von Nachteil ist, dass nur einzelne, extreme Ereignisschäden geschätzt werden können. Dadurch ist es nicht möglich, durchschnittliche Jahresschadenlasten für ein betrachtetes Portfolio zu ermitteln, sowie Ereignissen eine Wiederkehrperiode zuzuordnen. Die **Wiederkehrperiode** beschreibt die durchschnittliche Zeitdauer, innerhalb derer das Ausmaß eines Ereignisses wiederholt oder übertroffen wird.

Probabilistische Modelle haben in den letzten Jahren stark an Bedeutung gewonnen. In probabilistischen Modellen wird die Gefährdung durch eine immense Anzahl von theoretisch möglichen Ereignissen abgebildet. Diese orientieren sich an historischen Ereignissen, nur dass die Parameter geringfügig geändert werden. So entstehen neue Ereignisse, die bisher noch nie stattgefunden haben, aus naturwissenschaftlicher Sicht aber durchaus auftreten können. Die Anzahl der simulierten Ereignisse über einen langen Zeitraum (1.000-10.000 Jahre) richtet sich nach der erwarteten Frequenz der untersuchten Naturgefahr. Das Resultat einer probabilistischen Modellierung ist eine Ereignisschadenliste, die es erlaubt eine Beziehung zwischen dem Schadenpotenzial und der **Eintrittsfrequenz** herzustellen, so dass jedem Ereignis eine bestimmte Wiederkehrperiode zugeordnet werden kann.

Naturgefahrenmodelle sind auf der ganzen Welt mittlerweile ein wichtiges Entscheidungskriterium bei der Beurteilung der Naturgefahren-Exponierung eines Versicherers oder Rückversicherers. Kommerzielle Modelle für die Schadenabschätzung der Naturgefahren Sturm und Erdbeben in Deutschland gibt es bereits seit vielen Jahren. Diesen wird in der Versicherungsbranche auch zunehmend Vertrauen geschenkt. Für die Naturgefahr Hagel gibt es seit 2004 ein

probabilistisches Modell, das überwiegend auf der Auswertung von Niederschlagsradaren basiert, und für die am stärksten hagelgefährdeten europäischen Staaten anwendbar ist.

Als Nutzer solcher Modelle sollte man den Ergebnissen jedoch nicht vollkommen vertrauen. Da die Modellierung von Naturgefahren mit einer ganzen Reihe großer Unsicherheiten verbunden ist, können die Ergebnisse aus den Naturgefahrenmodellen immer nur ein Anhaltspunkt für Entscheidungen sein. Deshalb ist es notwendig, vorhandene Modelle auf ihre Funktionsweisen und Annahmen hin zu untersuchen, als auch eigene Modellansätze zu entwerfen.

1.3 Geschichtlicher Hintergrund der Hagelforschung, ihrer

Messinstrumente und Modellierung

Die folgenden historischen Angaben basieren hauptsächlich auf "A History of the Theories of Rain and Other Forms of Precipitation" (MIDDLETON, 1965).

Wissenschaftliche Studien über Hagel haben eine lange Vergangenheit. Bereits Anfang des 17. Jahrhunderts entdeckte Descartes, ein bekannter Philosoph, Mathematiker und Naturwissenschaftler seiner Zeit, dass Hagelkörner im Kern oft Schnee enthalten. Die Erforschung des Siede- und Gefrierpunktes von Wasser an der Academia del Cimento in Florenz 150 Jahre später ebnete den Weg für die wichtige Erkenntnis, dass Hagel in Wolken nur bei unterkühlten Wassertropfen entstehen kann (Saussure, Mitte des 18. Jahrhunderts). Um 1900 wurde von de Volta das erste Mal erwähnt, dass Eiskeime wie Wassertropfen oder Graupel zur Bildung von Hagel in Wolken notwendig sind. Im letzten Jahrhundert hat man sich der schwierigen Fragestellung gewidmet, wie Hagel vorhergesagt und modelliert werden kann. Dies geschah insbesondere im Hinblick auf den ökonomischen Nutzen für die Gebiete Luftfahrt und Landwirtschaft, die durch schwere Hagelstürme enorme Schäden erleiden können. Mitte des 20. Jahrhunderts wurden deshalb große Forschungsprojekte in Westeuropa, der ehemaligen Sowjetunion, Japan, Nord- und Südamerika sowie Südafrika initiiert, um umfassende Studien über Gewitter und Hagelstürme anzufertigen. Neben dem Auftrag, ein besseres Verständnis für die komplizierten mikrophysikalischen Vorgänge in konvektiven Stürmen zu entwickeln, bestand ein verstärktes Forschungsinteresse darin, wie man die Effekte

von schweren Hagelstürmen abschwächen kann. Mit der Methode des „Cloud Seeding“ versuchte man, durch das Impfen der Wolken mit Silberjodid die Anzahl der Gefrierkeime künstlich zu erhöhen, um kleinere Hagelkörner entstehen zu lassen, deren Schaden am Boden gering bleibt. Daneben entsteht durch das starke Gefrieren an den künstlichen Eiskeimen mehr Gefrierwärme. Der Auftrieb der konvektiven Wolke erhöht sich, wodurch wiederum der Wasserdampffluss in die Wolke erhöht wird. Der stärkere Aufwind sowie der erhöhte Wasserdampffluss erhöhen nach dieser Theorie die Effizienz der Niederschlagsproduktion. Wissenschaftlich konnte der Effekt der Hagelabwehr durch „Cloud Seeding“ jedoch nicht nachgewiesen werden (siehe dazu ausführlich DESSENS, 1995 u. 1998; KRAUSS u. SANTOS, 2004; SIMEONOV, 1996).

Im Zuge dieser großen Forschungsprojekte entwickelten sich auch mehr Möglichkeiten und Ansätze, Hagel qualitativ und quantitativ zu messen:

Eine der ältesten Methoden sich Hagelmustern und Hagelhäufigkeiten zu nähern, ist das Sammeln von Berichten freiwilliger Hagelbeobachter, die in den untersuchten Flächen leben (WOJTIW, 1975); eine immer noch sehr verbreitete und wertvolle Informationen liefernde Methode, die jedoch aufgrund der subjektiven Einschätzung der Hagelereignisse häufig zu fehlerhaften Einschätzungen der Parameter führt (TOWERY et al., 1976a). So haben mehrere Studien gezeigt (z.B. CHANGNON, 1971a; CHARLTON et al., 1995), dass Hagelkörner und der verursachte Schaden von der Öffentlichkeit häufig in ihrer Größe überschätzt werden. CHARLTON et al. (1995) fanden heraus, dass die maximale Hagelkorngröße im Durchschnitt um 20 % höher eingeschätzt wurde.

Eine andere Art Hagelkörner am Boden zu messen sind so genannte Hagelmatten. Es gibt verschiedene Typen von Hagelmatten, die sich in ihren grundlegenden Eigenschaften aber nicht voneinander unterscheiden: Sie bestehen aus semielastischem Material, meist Styropor, das von einer Aluminiumfolie umwickelt ist. Bei einem Hagelschlag wird die Hagelmatte eingedrückt, so dass Anzahl und Größe der Hagelkörner gemessen werden können (GIAIOTTI et al., 2003). Bei einem dichten Netzwerk von Hagelmatten kann so die räumliche und zeitliche Verteilung dokumentiert werden. Auch wenn von ihnen die zuverlässigsten Daten von Bodenmessungen zur Bestimmung exakter Strukturen räumlicher Hagelvariabilität gewonnen werden können, beschränken sich diese Studien meist

auf wenige Jahre, da dichte Netzwerke technisch und finanziell schwer zu unterhalten sind (HOHL et al., 2002).

Eine ausführliche Beschreibung verschiedener Messgeräte sowie ihrer Vor- und Nachteile liefert TOWERY (1976a) in „A review of hail-measuring instruments“.

Neueste Ansätze für die Entwicklung von Hagelvorhersagen und Hagelmodellen stützen sich auf die Auswertung von Radar- und Satellitenbildern. Radar hat gegenüber Bodenmessungen den großen Vorteil, dass das lokale Wetterphänomen Hagel durch die weite räumliche Abdeckung flächendeckend und mit einer hinreichend genauen räumlichen und zeitlichen Auflösung erfasst werden kann (DELOBBE et al., 2003). Der einfachste Weg um Hagel von Regentropfen in Wolken durch Radar unterscheiden zu können, basiert auf dem „Pseudo Constant Altitude Plan-Position Indicator“ (Pseudo CAPPI). Dieser stellt die Reflexion der Radarwellen in einer bestimmten Höhe dar. Große Hagelkörner haben eine sehr hohe Reflexion, die Regentropfen niemals erreichen können. Die Reflexionsgrenze zwischen Hagel und Regen wird in der Regel bei 55 dBZ gesetzt (DELOBBE et al., 2003; HOHL et al., 2002). Diese Methode ist erfolgreich in Fällen von schweren Hagelstürmen, erlaubt es aber nicht, zwischen schwachen Hagelstürmen und schweren Regenstürmen zu unterscheiden. Nach einer Methode von WALDVOGEL et al. (1979) kann die Wahrscheinlichkeit von Hagel jedweder Größe, die Wahrscheinlichkeit von großen Hagelkörnern (Durchmesser > 19 mm) und die maximale Hagelkorngröße geschätzt werden. Dabei wird die Wahrscheinlichkeit von Hagel von der Differenz zwischen der beobachteten Reflexionsgrenze von 45 dBZ und der Höhe der Gefriergrenze abgeleitet. Wenn die Höhendifferenz größer als 1,4 km ist, ist dies ein positives Signal für das Vorkommen von Hagel in der Gewitterwolke. Die Wahrscheinlichkeit von Hagel steigt mit der Höhe der Differenz. Eine 100%-ige Wahrscheinlichkeit wird bei einer Höhendifferenz von 6 km erreicht. Neben weiteren Radartechniken bietet die zusätzliche Implementierung von Satellitenbildern einen weiteren Ansatzpunkt, Hagelgewitter zu erkennen. Das sichtbare Spektralband (VIS) gibt eine Einschätzung des vertikalen Ausmaßes einer Wolke. So können hohe und dichte Cumuluswolken, in denen Hagel entstehen kann, von den feinen Cirruswolken unterschieden werden. Das thermische Infrarotspektralband (IR) liefert zusätzliche Informationen über die Temperaturverhältnisse. Durch starke Konvektion können Gewitterwolken bis in die obere Troposphäre hineinreichen. Der Wolkentop weist relativ zu seiner Umgebung

eine sehr viel tiefere Temperatur auf, so dass am Rand der Wolke ein starker Temperaturgradient entsteht. Dies ermöglicht die Umgrenzung der Gewitterwolke. Eine Kombination von IR-Daten und VIS-Daten erlaubt so eine klare Diskriminierung zwischen tiefen, warmen Cirruswolken und sich hoch auftürmenden, kalten Cumuluswolken (BAUER- MESSMER u. WALDVOGEL, 1996).

Die Verwendung von Schadendaten aus der Versicherungswirtschaft ist ein weiteres wirkungsvolles Instrument, um z.B. die räumliche und zeitliche Variabilität von schadenverursachenden Hagelgewittern zu untersuchen (CHANGNON, 1997), die Effizienz von Hagelabwehrmaßnahmen zu messen (SMITH et al., 1997; SIMEONOV, 1996) oder die Hagelfrequenz und Hagelfläche zu berechnen (LONG, 1980). Diese Daten sind bei der Schadenmodellierung besonders wertvoll, da sie Hagelintensität und Hagelschaden kombiniert betrachten.

Die Modellierung von Hagelereignissen mit Hilfe der hier genannten Messinstrumente ist vielfältig und insbesondere zur Abschätzung von Schäden an landwirtschaftlichen Produkten detailliert untersucht worden (CHANGNON, 1971a u. 1972; SIMEONOV, 1996; TOWERY et al., 1976b). Dagegen sind Veröffentlichungen über die Modellierung von extremen Hagelereignissen zur Abschätzung von Schäden an Kraftfahrzeugen kaum vorhanden. Lediglich HOHL et al. (2002) haben in ihrer Studie über die Verwendung von Wetterradardaten, um Schäden an Kraftfahrzeugen abzuschätzen, diese Thematik ausführlich behandelt. Dies mag darauf zurückzuführen sein, dass durch Hagel verursachte Kosten in erster Linie für Versicherungsunternehmen interessant sind und Studien über Modellentwicklungen meist unveröffentlicht bleiben.

2 Material

Im Folgenden sollen die für das Hagelmodell verwendeten Daten und Software beschrieben werden. Diese mussten zum Teil in andere Datenformate umgewandelt, georeferenziert und harmonisiert werden, um sie in das Modell integrieren zu können. Dabei soll nicht unerwähnt bleiben, dass die Sammlung hagelbeschreibender Daten äußerst schwierig ist. Die natürliche Variabilität von Hagel in Raum, Zeit und Ausprägung ist im Vergleich zu anderen meteorologischen Phänomenen sehr groß und das Auftreten eines Hagelereignisses an einem bestimmten Ort ist sehr selten. SCHIESSER (1988) findet dazu einen hervorragenden Vergleich: „Messungen der Temperaturverhältnisse beispielsweise können kontinuierlich durchgeführt werden, Regenfälle können oft und verbreitet registriert werden, aber Hagelereignisse lassen sich mit wenigen Beobachtungsstellen nicht mehr erfassen.“

Eine gute Informationsquelle stellt die „European Severe Weather Database“ dar, die von einem europäischen Unwetterforschungszentrum, dem „European Severe Storms Laboratory“, unterhalten wird. Vorrangig dient sie der Vorsorge, Vermeidung und Nachsorge im Fall schadenbringender Sturmereignisse und mit ihr verbundener Sekundärphänomene wie Hagel, Sturzflut und Blitzentladung. Die öffentlich zugängliche Datenbank liefert insbesondere für die letzten Jahre wertvolle Einträge über extreme Hagelereignisse in Deutschland.

2.1 Software

Grundlegende Software sowohl für die Bearbeitung der Rohdaten als auch für die Modellierung der extremen Hagelereignisse selbst ist das Geo-Informationssystem (GIS) ArcGIS 9.1 der Firma ESRI. Die zentrale Funktionseinheit ist die Desktop-Anwendung ArcMap, mit der die Visualisierung, Bearbeitung, Analyse und Abfrage der Daten mittels kartographischer Darstellung erfolgt. Die Funktionspalette von ArcMap beinhaltet Editierfunktionen, Abfragefunktionen, Werkzeuge zum Verschneiden von Ebenen, zahlreiche Selektionsmöglichkeiten sowie verschiedene Möglichkeiten der Layouterstellung. Optionale Erweiterungen von ArcMap wie der Spatial Analyst wurden ebenfalls genutzt.

2.2 Versicherungsdaten

Die Grundlage des Hagelmodells für die Zuweisung von Hagelhäufigkeiten an die simulierten extremen Hagelereignisse sind Hagelschadenmeldungen von Landwirten an Versicherungen. Verzeichnen Landwirte einen Schaden durch Hagel auf ihren Feldern, so wird dies der Versicherung gemeldet, die die Gemeinde, in der der Hagelschlag niederging, sowie das Datum des Hagelereignisses erfasst. Die Schadendaten der Landwirte gehen überwiegend in der Vegetationszeit der angebauten Feldfrüchte ein. Daher sind Beobachtungen von Hagel auf diese Zeit beschränkt. Da jedoch die Vegetationsperiode der meisten Feldfrüchte mit der Saisonalität von Hagel übereinstimmt (Mai bis August, s. 3.1.6.2 Hagelsaisonalität) und überwiegend nur die Feldfrüchte versichert werden, die eine hohe Anfälligkeit gegenüber Hagel aufweisen, bleibt der Fehler gering. Des Weiteren kann angenommen werden, dass bei einer durchschnittlichen Gemeindegröße von 500 ha in Deutschland nur in wenigen Gemeinden bestimmte Feldfrüchte (z.B. Wein, Hopfen oder Tabak) stark dominieren. Daher bleiben Abweichungen von der wahren Ereigniszahl der Hagelschläge gering (vgl. KLEINSCHROTH, 1999).

Die registrierten Daten der Versicherung geben darüber Auskunft, wie häufig es zu Hagelereignissen gekommen ist. Aus den gezahlten Ausgleichsentschädigungen lässt sich schließen, welche Intensität diese hatten: je höher die Summe der Entschädigung desto intensiver das Hagelereignis. Dabei ist jedoch zu beachten, dass bei gleicher Intensität die Schäden an verschiedenen Feldfrüchten unterschiedlich ausfallen können: Ein Hagelkorn mit einem Durchmesser von 10 mm verursacht an einer Tabakpflanze einen anderen Schaden als an einer Maispflanze. Dies hängt sowohl von der Schadenempfindlichkeit als auch von der Wertigkeit der Pflanze ab. Die Resistenz einer Feldfrucht kann zudem je nach Reifezustand stark schwanken. Ein junger Pflanzentrieb ist weitaus anfälliger als eine voll ausgewachsene Pflanze. Daneben ist die Resistenz der Feldfrüchte, wenn sie nass sind, durch die erhöhte Elastizität größer (SÀNCHEZ et al., 1996). Das bedeutet, wenn es vor dem Hagelfall regnet, wird der Schaden geringer ausfallen. Es wird deutlich, dass der Zusammenhang zwischen der Höhe des Schadens und der Intensität eines Hagelereignisses sehr komplex ist. Folgerichtig ist die Verwendung von landwirtschaftlichen Schadendaten zur Abschätzung von Schäden an

Kraftfahrzeugen, welche wiederum eine andere Schadenempfindlichkeit aufweisen, äußerst schwierig.

Landwirtschaftliche Schadendaten eignen sich aber hervorragend zur Abschätzung von Hagelfrequenzen. Die Versicherung registriert, wie viele Tage es pro Jahr in einer Gemeinde hagelt. Diese Information beinhaltet lediglich, ob es gehagelt hat oder nicht. Eine Aussage zum Schaden wird nicht getroffen. Dennoch ist auch diese Information mit Vorsicht zu behandeln: Schäden an Feldfrüchten entstehen bereits bei Hagelkörnern ab einem Durchmesser von 5 mm. CHANGNON (1971b) und OMOTO u. SEINO (1978) ermittelten für Weizen, Mais und Sojabohnen einen Schwellenwert von 6,4 mm. Ernste Schäden an Kraftfahrzeugen entstehen aber erst ab einer Größe von 20 mm (HOHL et al., 2002). Dies bedeutet, dass ein Hagelschlag mit Hagelkörnern < 20 mm, der einen Schaden an einer Feldfrucht hervorgerufen hat, von der Versicherung als Hageltag registriert wird, dieser aber für ein Kraftfahrzeug ohne Folgen bliebe. Dieses muss später bei der Implementierung der Hagelfrequenzen beachtet werden.

Abbildung 1 stellt die durchschnittliche jährliche Anzahl der Hageltage pro Gemeinde von 1990 bis 1996 in Deutschland dar; erstellt aus landwirtschaftlichen Schadenmeldungen von Versicherungen (MÜNCHENER RÜCK, 1997). Um die Häufigkeit von Hagelschäden zu ermitteln, wurde die totale Anzahl der registrierten Hagelereignissen für jede Gemeinde während der Jahre 1990 bis 1996 durch die Anzahl der beobachteten Jahre dividiert.

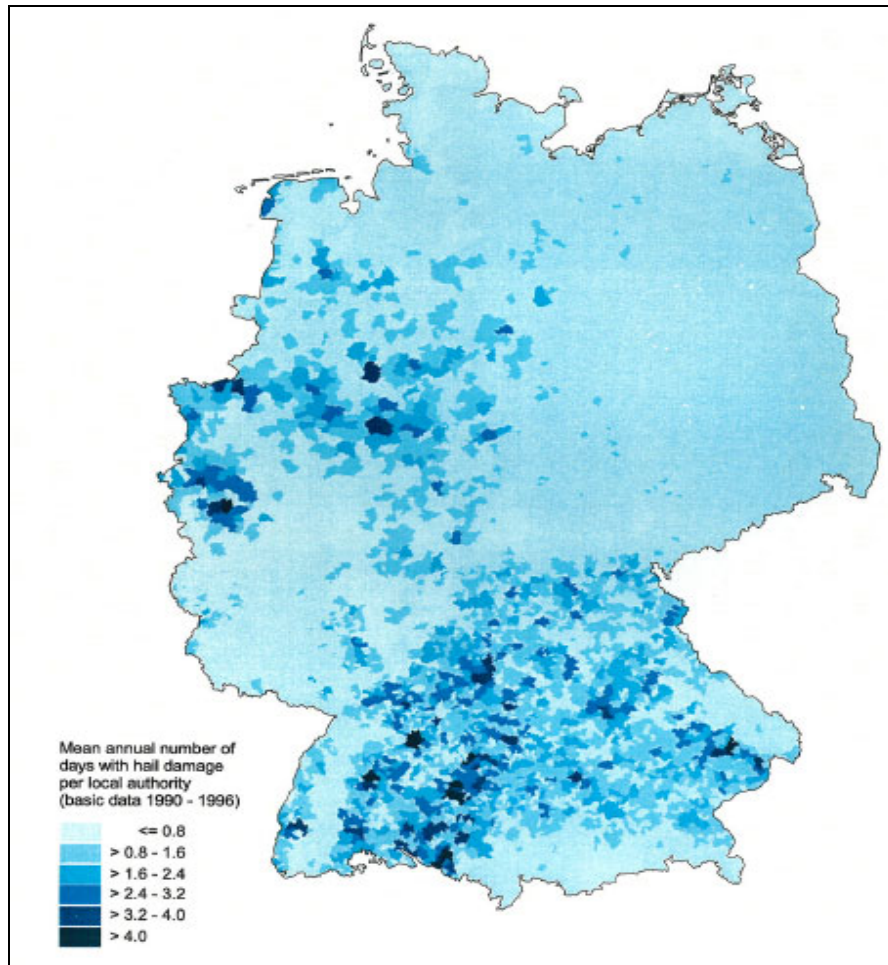


Abbildung 1: Häufigkeitsverteilung der Hageltage in Deutschland pro Jahr (Quelle: MÜNCHENER RÜCK, 1997)

Die Karte der Häufigkeitsverteilung der Hageltage in Deutschland wird in ArcGIS importiert, georeferenziert und in ein Rasterformat überführt. Jede Rasterzelle hat eine Größe von 2.500*2.500 m und nimmt den Wert der Gemeinde an, in der die Rasterzelle die größte Fläche hat. Dies ist notwendig, um später den simulierten Hagelereignissen Eintrittswahrscheinlichkeiten zuweisen zu können.

2.3 Kraftfahrzeugdaten

Statistische Daten über die Kraftfahrzeugbestände in Deutschland liegen in zwei Varianten vor: Zum einen spiegeln sie den totalen Personenkraftwagenbestand (Abb. 2) wider zum anderen den versicherten Personenkraftwagenbestand. Letztere stammen vom Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (GDV). Die Daten werden für die ersten Testdurchläufe des Hagelschadenmodells benutzt.

Bei einer späteren Anwendung des Hagelschadenmodells können aber Portfolios jeglicher Art eingelesen werden. Diese liegen meist in Datenformaten vor, die harmonisiert werden müssen, bevor sie in ein Modell eingelesen werden können. Es kann mitunter eine sehr zeitaufwendige Arbeit sein, da jede Versicherung ihre eigenen Methoden zur Datenerfassung und -speicherung hat. Ein häufig auftretendes Problem stellen Fuhrparks von großen Firmen dar, die z. T. mehrere tausend Risiken umfassen, aber alle unter einer Police versichert sind und somit sich die einzelnen Risiken kaum noch lokalisieren lassen. Firmenfahrzeuge können bis zu 15 % aller versicherten Risiken ausmachen und repräsentieren folglich einen großen Teil des Portfolios eines Versicherungsunternehmens.

Die geographische Verteilung von Kraftfahrzeugen kann nach unterschiedlichen Regionen festgelegt sein. Versicherungsdaten sind häufig in Cresta-Zonen, ein globaler Standard der Versicherungsindustrie, unterteilt. Die Cresta-Organisation wurde 1977 von interessierten Teilen der Versicherungswirtschaft ins Leben gerufen und befasst sich mit der Ausarbeitung eines weltweit einheitlichen Systems zur Kumulkontrolle von Naturgefahren wie Erdbeben, Sturm, Überschwemmung und Hagel. Diese gelten heute in der internationalen Versicherungswirtschaft als breit akzeptierte Standards. In Deutschland existieren 95 Zonen, wobei bspw. Zone 1 die fünfstelligen Postleitzahlenbereiche 01001-01999 abdeckt. Cresta-Zonen haben in den vergangenen Jahren jedoch immer mehr an Bedeutung verloren. Insbesondere bei den Naturgefahren Überschwemmung und Hagel ist die geographische Auflösung zu grob, um die kleinräumige Gefahr exakt abzubilden. Daher werden Daten auf Postleitzahlebene bevorzugt, da sie die höchste geographische Auflösung haben. Für Deutschland liegen die Daten meistens auf Postleitzahl-, Landkreis-, Gemeinde- und bei Kraftfahrzeugen Zulassungsbezirksebene vor. Sowohl der totale als auch der versicherte Personenkraftwagenbestand sind nach Landkreisen festgelegt. Demzufolge werden alle Analysen des Hagelschadenmodells auf Landkreisebene durchgeführt.

Die unterschiedliche geographische Auflösung der Daten führt bei der Aggregation bzw. Transformation häufig zu Problemen, da die Grenzen nicht immer konform verlaufen. Umformungen sind zwar möglich, jedoch immer mit einer Unsicherheit behaftet.

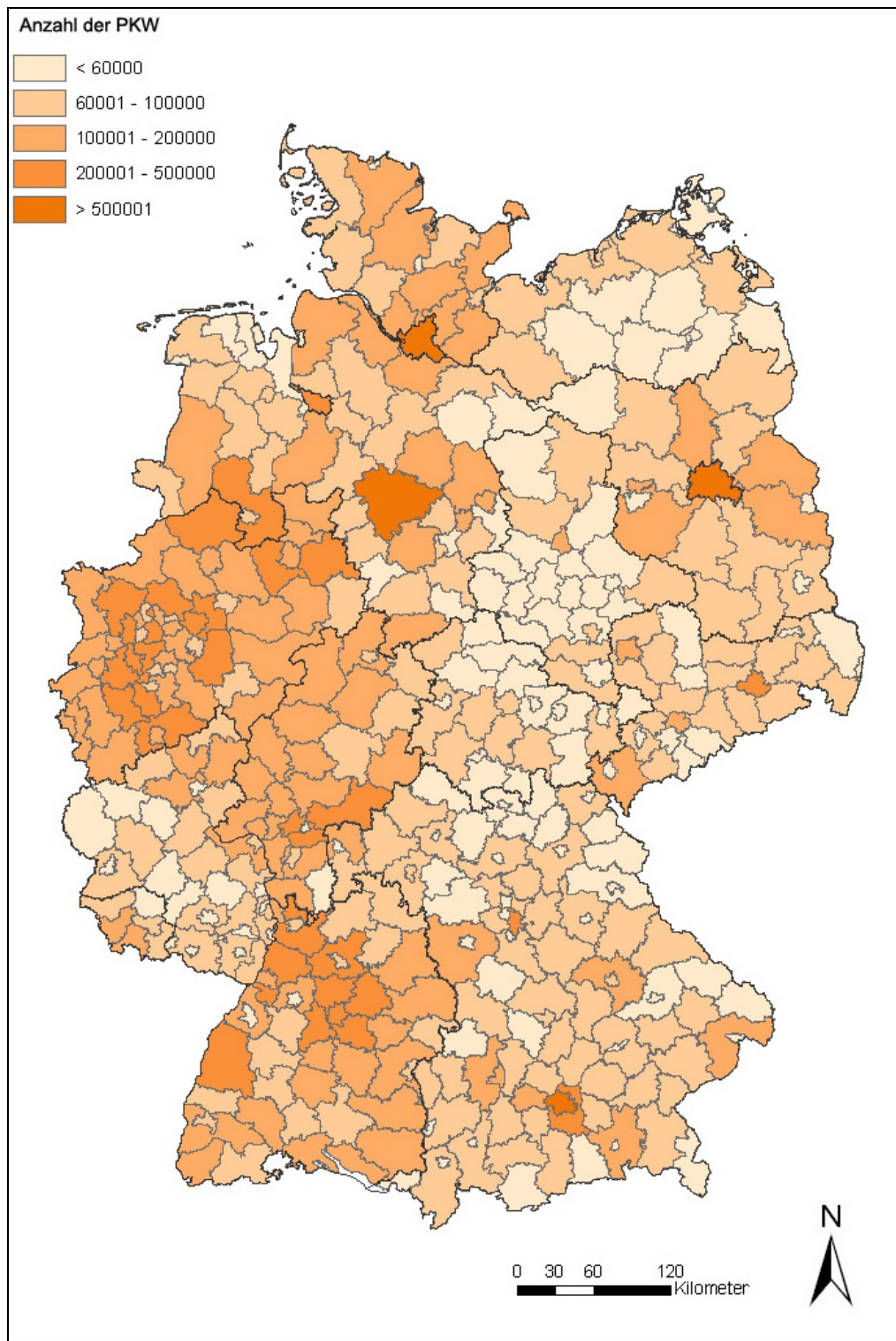


Abbildung 2: Totaler Bestand an Personenkraftwagen in Deutschland

2.4 Corine Land Cover Daten

Corine Land Cover (CLC) Daten dienen der Beschreibung der Bodenbedeckung und Landnutzung. Sie entstammen dem europaweiten Projekt CORINE Land Cover und

sind Teil des Programms CORINE (Coordination of Information on the Environment) der Europäischen Union. Die Kartierung der Bodenbedeckung und Landnutzung wurde auf der Basis von Satellitendaten im Maßstab 1:100.000 durchgeführt. Dies sind europaweit einheitlich orthorektifizierte Landsat-7 Daten aus den Jahren 1999 bis 2001, die auf der Datengrundlage der Ersterfassung CLC 1990 basieren. Ein harmonisierter Klassifizierungsschlüssel und eine einheitliche Erfassung sorgen für eine gute Vergleichbarkeit im europäischen wie nationalen Kontext. Nach dem Kartierungsschlüssel gibt es 44 Landnutzungsklassen, von denen 37 Klassen in Deutschland relevant sind, die in drei Hierarchieebenen angeordnet sind. Die Hauptkategorien sind dabei bebaute Flächen, landwirtschaftliche Flächen, Wälder und naturnahe Flächen, Feuchtflächen und Wasserflächen. Zweck der CLC Daten ist die Verteilung von Kraftfahrzeugen nur auf Gebiete, in denen sie sich in der Realität auch wirklich befinden können. Die geographische Verteilung der Kraftfahrzeugdaten, ob auf Cresta-, Postleitzahl-, Gemeinde- oder Kreisebene, nimmt an, dass die Anzahl der Kraftfahrzeuge gleichmäßig über die Fläche verteilt ist. So ist aber die Wahrscheinlichkeit, dass ein Kraftfahrzeug auf landwirtschaftlichen oder Waldflächen vorkommt, sehr gering, während auf bebauten Flächen eine Konzentration von Kraftfahrzeugen besteht.

Die in einem Rasterformat vorliegenden CLC Daten wurden in ArcGIS importiert und so dargestellt, dass nur noch nach bebauten und unbebauten (Wälder, landwirtschaftliche und naturnahe Flächen, Feucht- und Wasserflächen) Gebieten unterschieden wird. Diese werden mittels einer Raster-Vektor-Konversion in das Vektorformat überführt. Nach BILL (1999) verläuft eine Raster-Vektor-Konversion über eine Skelettbildung bei linienhaften Phänomenen oder mittels Umringspolygonen bei eher flächenhaften Phänomenen. Bei der Erstellung des Distanzbildes wird jedem Element des Objektes sein kürzester Abstand zum Rand des Objektes zugeordnet. Die Vektorlinie ergibt sich dann durch Verfolgung der Pixel mit dem höchsten Distanzwert. Abbildung 3 gibt die bebauten Flächen in Deutschland nach der Corine Land Cover Klassifizierung wieder: Starke Verdichtungen lassen sich deutlich in den Regionen Hamburg, Berlin, Hannover, Frankfurt, Stuttgart, München und dem Ruhrgebiet erkennen.

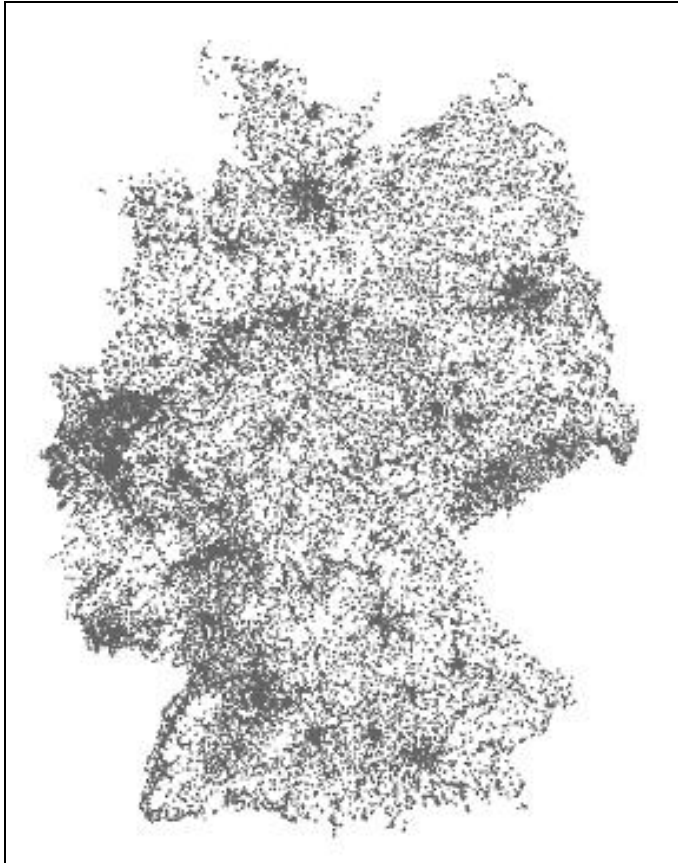


Abbildung 3: Bebaute Flächen nach der Corine Land Cover Klassifizierung

3 Funktionsweise des Hagelschadenmodells

In diesem Kapitel werden der strukturelle Aufbau des Hagelschadenmodells sowie die Funktionsweise seiner einzelnen Komponenten beschrieben. Abbildung 4 gibt einen Überblick über die vier Hauptkomponenten des Naturgefahrenmodells wieder:

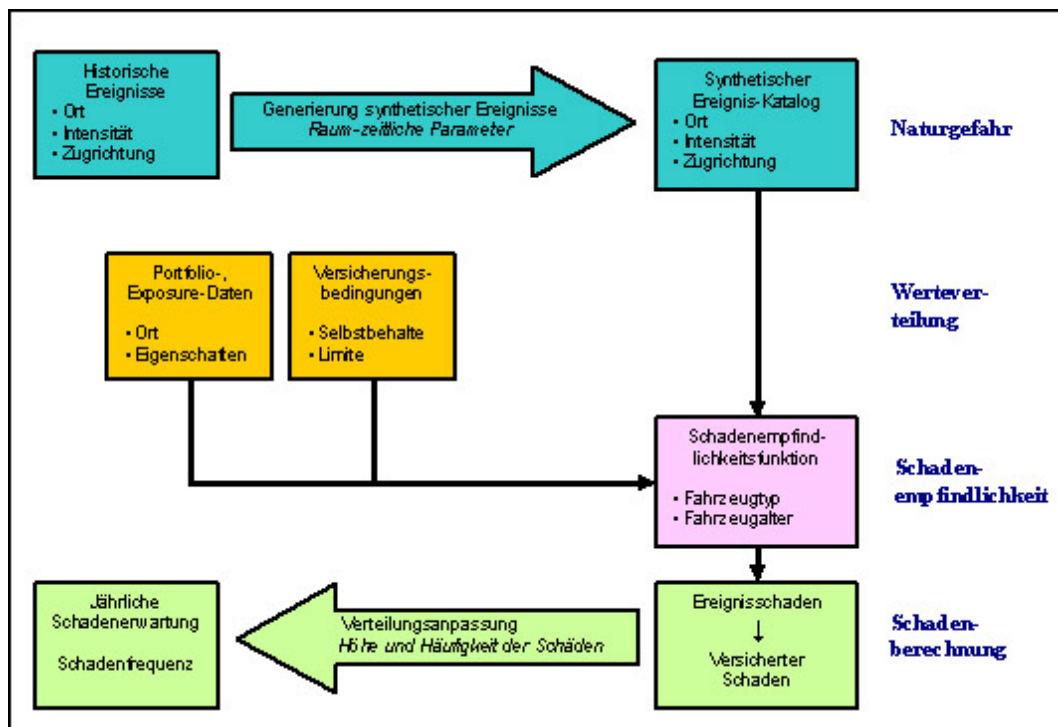


Abbildung 4: 4-Komponenten-Naturgefahrenmodell

1. **Naturgefahr:** Die Naturgefahrenkomponente schätzt die potenzielle Gefahr extremer Hagelereignisse ab. Extreme Hagelereignisse sind in ihrer Natur äußerst komplex und ihre Charakterisierung bedarf einer großen Anzahl von Parametern. Da Aufzeichnungen und Daten über historische Hagelereignisse nicht in ausreichender Anzahl vorliegen, um eine Vielzahl von möglichen Ereignissen abzubilden, wird ein synthetischer Ereigniskatalog aufgebaut. In diesem sind Ereignisse abgelegt, die man mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit für möglich hält, die aber bisher noch nicht eingetreten sind. Sie unterscheiden sich z.B. in ihrer Zugrichtung oder räumlichen Ausdehnung. Die Größe des Ereigniskatalogs ist dadurch um ein Vielfaches größer als die aufgezeichneten historischen Ereignisse. Dies sichert die

Erstellung von Ereignissen in einem Umfang, der alle möglichen Variationen repräsentativer extremer Hagelereignisse abdeckt.

2. **Werte Verteilung:** In der Werte Verteilungskomponente werden die exponierten Risiken gegenüber der Naturgefahr Hagel dargestellt. Dafür müssen die Daten der versicherten Objekte vorhanden sein, für die eine Schadenmodellierung vorgenommen werden soll. Wichtige Angaben sind die Anzahl der Kraftfahrzeuge, deren geographische Lage sowie zusätzliche Informationen wie das Baujahr oder der Fahrzeugtyp. Ebenso bedeutend sind Angaben über die Versicherungsbedingungen wie Selbstbehalte, die für Versicherungsunternehmen wichtige Instrumente sind, um das Risiko zu einer adäquaten Prämie versicherbar zu machen. So wird mit Anwendung der Versicherungsbedingungen aus dem Bruttoschaden am Kraftfahrzeug der Nettoschaden für den Versicherer berechnet.
3. **Schadenempfindlichkeit:** Das Ausmaß des Schadens am Kraftfahrzeug ist von zwei Faktoren abhängig: von der Intensität des Hagelsturms und von der Schadenempfindlichkeit des Kraftfahrzeugs. Wichtige Eigenschaften von Kraftfahrzeugen, die die Schadenhöhe beeinflussen, sind z. B. das Fahrzeugmodell und Baujahr. Um die Beziehung zwischen Intensität und Schadenempfindlichkeit genau beschreiben zu können, werden eine Vielzahl von Schadenempfindlichkeitskurven erstellt. Mit diesen wird dann die Schadenhöhe unterschiedlicher Versicherungsobjekte, die einer bestimmten Intensität eines Hagelereignisses ausgesetzt sind, abgeschätzt. Da es nicht möglich ist, für alle Fahrzeugtypen eine eigene Schadenempfindlichkeitskurve zu konstruieren, werden Fahrzeugtypen mit ähnlichen Eigenschaften zu Risikoklassen zusammengefasst.
4. **Schadenberechnung:** Mit der Kombination der vorhergegangenen Module kann der potenzielle Schaden eines Portfolios abgeschätzt werden. Das Naturgefahrenmodell erzeugt eine komplette Wahrscheinlichkeitsverteilung der Schäden, dargestellt in einer Schadenfrequenzkurve; Aus dieser lässt sich die Schadenhöhe ablesen, die als Risikomaß für extreme Ereignisschäden verwendet wird. Aus der Liste der Ereignisschäden kann zudem für ein Portfolio der jährlich zu erwartende Schaden ermittelt werden.

3.1 Die Naturgefahr Hagel

Eine Studie über die Schadenmodellierung von extremen Hagelereignissen in Deutschland setzt ein umfassendes naturwissenschaftliches Verständnis dieses Naturphänomens voraus. Die Entwicklung von Hagel in konvektiven Sturmsystemen ist trotz intensiver Forschung in den letzten 50 Jahren immer noch nicht vollständig geklärt. Das liegt u. a. daran, dass die Mikrophysik, Kinematik und Dynamik von Hagelgewittern sich aus einem komplexen System von Parametern zusammensetzt. Dieser Teil des Hagelschadenmodells produziert einen Ereigniskatalog von stochastischen Hagelereignissen, von denen jedes durch folgende Parameter charakterisiert ist:

- räumliche Ausdehnung des Hagelereignisses
- Zugrichtung des Hagelsturms
- jährliche Häufigkeit
- Kern- und Randzone des Hagelsturms

Die verwendeten Parameter erfahren in den folgenden Kapiteln eine ausführliche Beschreibung und es wird beschrieben, wie diese in das Modell integriert werden. Darüber hinaus sollen aber auch diejenigen Parameter erwähnt werden, die bisher noch nicht in das Modell integriert werden konnten, die aber für eine verbesserte Abbildung der extremen Hagelereignisse wertvoll wären.

3.1.1 Die Entwicklung von Hagel in konvektiven Sturmsystemen

In der Darstellung der Entwicklungsbedingungen von schweren Hagelgewittern wirkt eine Vielzahl makro- und mesoskaliger Prozesse in unterschiedlicher Kombination zusammen. Das Zusammenspiel von makroskaligen Prozessen, die eine geeignete thermodynamische Struktur schaffen, und mesoskaligen Prozessen, die eine Konvektion von Luftmassen bewirken können, ist für die Entwicklung von schweren Hagelgewittern entscheidend (HOHL et al., 2002).

Dabei sind die meteorologischen Verhältnisse und die allgemeine Wetterlage, welche den Hagelwettern vorausgehen und sie begleiten, die gleichen wie für Gewitter. Jedoch tritt nicht in allen Gewittern Hagel auf (vgl. HEY u. WAYLEN, 1987).

Für die Entstehung von Hagel in Gewittern müssen nach WALDVOGEL (1997) einige Elemente zusammenspielen:

- Labilität der Troposphäre
- vorhandene Feuchtigkeit
- Auslösemechanismus wie vorzugsweise eine Kaltfront
- starke Konvektion
- vertikale Windscherung

Bedingung der Formierung mesoskalig organisierter konvektiver Wettersysteme ist die beschleunigte, aufwärts gerichtete Vertikalbewegung großer Luftmassen. Dafür bedarf es einen großen Temperaturgradienten bei gesättigter Luft, so dass eine instabile Schichtung entstehen kann, die für eine große Gewitterintensität benötigt wird. Eine instabile Schichtung wird dann erreicht, wenn große Temperaturunterschiede zwischen der Grenzschicht am Boden und den höheren Niveaus bestehen. Erst dann können in große Höhen reichende und langlebige konvektive Zellen entstehen, in denen sich großer Hagel bilden kann. Nach einer Studie von SCHIESSER et al. (1995) sind diese mesoskaligen konvektiven Systeme für einen weit verbreiteten Hagelschaden verantwortlich, insbesondere wenn mehrere dieser Zellen sich zu Linien formieren.

Diese Vorgänge werden von großräumigen Wetterlagen bestimmt. WALDVOGEL (1997) hat im Zusammenhang mit der Klimaänderung anhand von Schadendaten untersucht, bei welchen Großwetterlagen es in der Schweiz zu Hagel kommt und ob in Zukunft verstärkt extreme Hagelereignisse auftreten werden. Dabei bieten fünf Wetterlagentypen nach der europäischen Großwetterlagenklassifikation optimale Bedingungen (Anhang A). Insbesondere die Wetterlage 29, „Trog über Westeuropa“, führt häufig zu extremen Hagelereignissen.

Auslöser für eine Hebung großer Luftmassen können Kaltfronten, aber auch orographische und Grenzschichteffekte sein. Fronten zeichnen sich durch eine sehr schmale Zone konzentrierter Baroklinität mit Wolkenbändern und Niederschlagsgebieten aus. Eine Temperaturgradientenänderung in dieser Zone, die zu einer Intensivierung (Frontogenese) führt, kann durch eine horizontale Windfeldänderung, durch horizontal unterschiedliche Vertikalbewegungen und/oder

durch horizontal unterschiedliche diabatische Wärmeübergänge verursacht werden (KURZ, 1986).

Strömen Luftmassen auf eine Gebirgsbarriere zu, findet eine gezwungene, aufwärts gerichtete Vertikalbewegung statt, die ebenfalls zu einer potenziellen Instabilität führt. Sowohl Orographie-Effekte als auch Frontogenese werden verstärkt, wenn sich die Luftmassen in ein bereits bestehendes konvektives System hineinbewegen und sich dadurch ein noch größeres bildet. Für diese konvektiven Systeme ist es charakteristisch, dass sie schnell eine Eigendynamik entwickeln und sich unabhängig vom externen Antrieb fortpflanzen.

Ein konvektives System kann aus einer einzigen Gewitterzelle bestehen oder sich aus mehreren zusammensetzen. Folgende Systeme sind in Mitteleuropa zu unterscheiden:

- gewöhnliche Gewitterzelle (ordinary cell)
- Multizellengewitter (multi cellular storms)
 - linienförmig (squall lines oder multicell line storms)
 - gruppenweise (multicell cluster storms)
- Superzellengewitter (supercell storms)
- Hybridzellengewitter (hybrid storms)

Während gewöhnliche Gewitterzellen selten oder nur kleine Hagelkörner entstehen lassen, produzieren hauptsächlich Superzellengewitter ausgedehnte Hagelzüge mit starkem Hagelfall (HOHL et al., 2002; SCHIESSER, 1988).

Die Abbildungen 5 und 6 zeigen Modellbilder eines hagelproduzierenden Systems.

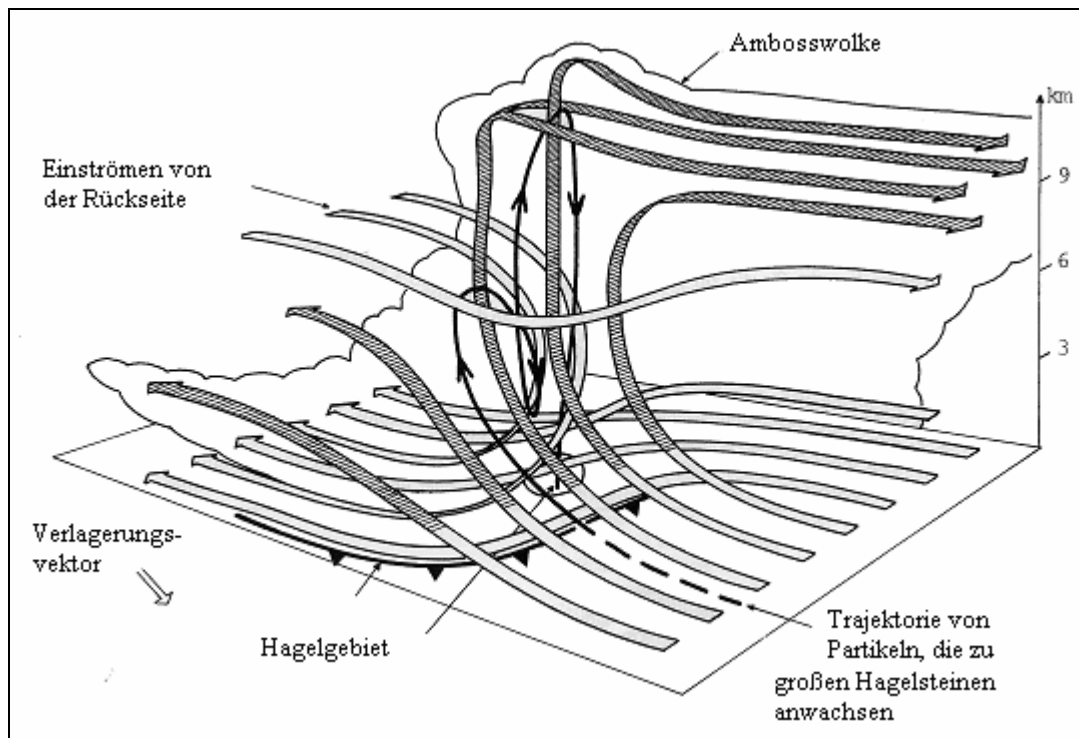


Abbildung 5: 3-D Modell eines konvektiven Sturmsystems (Quelle: SCHIESSER, 1988)

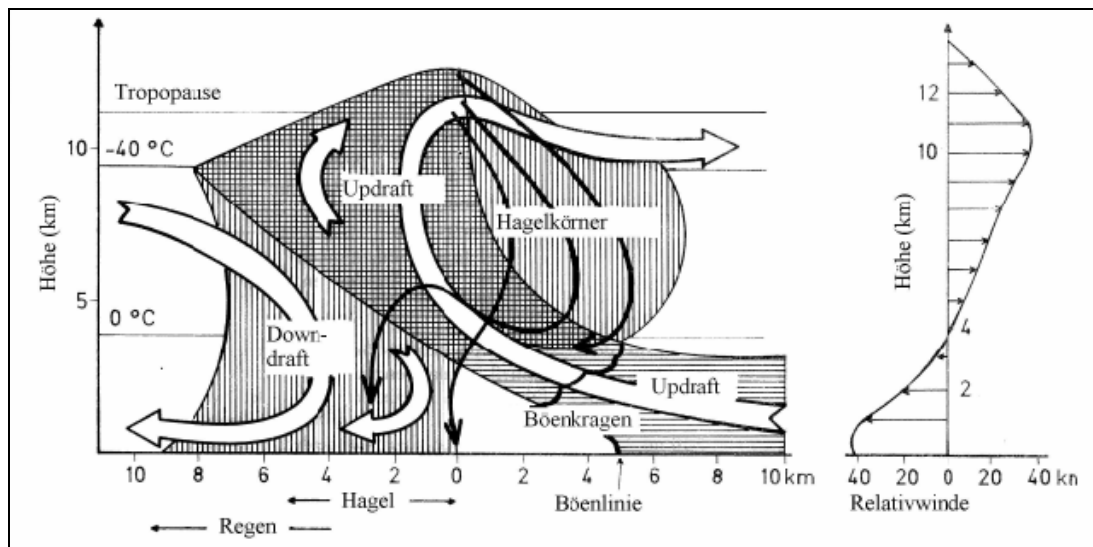


Abbildung 6: Vertikalschnitt durch ein hagelproduzierendes System (Quelle: SCHIESSER, 1988)

Entscheidend für die Hagelbildung innerhalb eines Gewittersystems ist eine vertikale Windscherung. Gewitterzellen ziehen mit einer Geschwindigkeit, die der Windgeschwindigkeit der mittleren Höhen (3-5 km) entspricht (KURZ, 1986). Sie sind deshalb schneller als der Bodenwind, aber aufgrund der Reibung langsamer als

die Höhenströmung. Bei einer relativen Verlagerung des Systems kommt es daher zu einem Einströmen von Luftmassen von vorn, in der Höhe dagegen ein Einströmen von der Rückseite. Diese thermisch direkte Zirkulation innerhalb des Systems, das Nebeneinander von kaltem Downdraft und warmem Updraft bildet den Antrieb. Die Lebensdauer der Zirkulation ist davon abhängig, wie lange ausreichend feuchte und vor allem potenziell instabil geschichtete Luftmassen in die Aufwindzone geführt werden. In der Aufwindströmung erfolgt die Kondensation und Niederschlagsbildung. In der Höhe ist der Updraft rückwärts geneigt. Dadurch fällt der Niederschlag in die Zone der einströmenden Luft des Downdraft und sorgt über den Verdunstungseffekt für dessen Abkühlung. In einer Höhe von 10 km konvergiert die aufsteigende Luft des Updraft mit der oberen schnelleren Strömung und knickt nach vorne um. Innerhalb des Updraft bildet sich der Hagel; Dabei ist die gebogene Form des Updraft sehr wichtig.

Die überhitzten, oft wasserdampfgesättigten unteren Luftschichten steigen auf und kühlen sich dabei ab. Niederschlagsbildung von Hagel erfolgt in den mittleren Breiten vorwiegend über die Eisphase der Wolkentropfen (nach der Bergeron-Findeisen-Theorie). Sobald der Taupunkt unterschritten wird, kondensiert ein Teil des Wasserdampfes zu Wolkentröpfchen. Dazu müssen Kondensationskerne, wie Staubeilchen in der Atmosphäre, vorhanden sein, an denen sich die Wolkentröpfchen anlagern können. Diese können sich bis zu -40°C abkühlen, ohne zu gefrieren (SCHIESSER, 1988). Es kommt zu Bildung unterkühlter Wassertröpfchen. Eine Umwandlung zu Eis beim Aufsteigen der Wolkentropfen innerhalb des Aufwindstroms erfolgt aber nicht zwangsläufig, sondern nur dann, wenn sie auf Eisbildungskerne treffen. Diese sind aber nur in relativ geringer Konzentration vorhanden, so dass nur wenige Wolkentropfen gefrieren. Da der Sättigungsdampfdruck über Eis geringer ist als über unterkühltem Wasser, strömt ständig Wasserdampf aus der Umgebung der Tröpfchen zu den Eiskernen und gefriert hier an. Die Wassertröpfchen werden aufgrund der Verarmung des Wasserdampfes immer kleiner und verschwinden letztlich. Die Eiskerne wachsen dagegen ständig an, insbesondere durch Berührung und spontanes Anfrieren von noch vorhandenen unterkühlten Tröpfchen (Koagulation), durch Verhaken von Schneekristallen (Schneeflockenbildung) und durch Anziehungskräfte bei entgegengesetzter elektrischer Ladung der Niederschlagselemente. Es entstehen zuerst lockere Eisgebilde von etwa 1 mm Durchmesser, die anschließend zu

Eispartikeln mit einem Durchmesser von < 5 mm (Graupel) anwachsen. Der Mangel von Gefrierkeimen ist für die Entstehung von extremen Hagelereignissen mit großen Hagelkörnern entscheidend. In großen Höhen bei mindestens -20°C und ausreichender Anzahl von Gefrierkeimen kann es auch zu einer direkten Umwandlung von Wasserdampf zu Eis kommen. Dann bilden sich sehr viele kleine Eiskristalle, die sich aber nicht zu Hagelkörnern vergrößern (vgl. Kap. 1.3, Cloud Seeding). Damit ein Hagelkorn weiter wächst, müssen im oberen Teil der Wolke (Ambosswolke) mindestens Windgeschwindigkeiten von 10m/s vorherrschen. Mitunter können die Winde im Updraft bis zu 50m/s schnell sein (LUDLAM, 1961). Ansonsten fallen die Eispartikel als Graupel oder Regen zu Boden, sofern die Falldistanz genügend Zeit zum Schmelzen lässt. Können die Eisgebilde aber längere Zeit in der Ambosswolke schweben, lagern sich immer mehr Wassertropfen an, so dass binnen weniger Minuten (10-15) Hagelkörner von mehreren Zentimetern Durchmesser entstehen (SCHIESSER, 1988). In Superzellengewittern können die starken Aufwinde bisweilen 60 Minuten und mehr andauern, während sie in gewöhnlichen Gewitterzellen 20-30 Minuten bestehen (BRIMELOW et al., 2002). Die in der Ambosswolke schwebenden Eispartikel fallen aus dem nach vorn gebogenen Teil der Strömung aus, werden in den unteren Schichten erneut vom Aufwind erfasst und wieder nach oben getragen. So werden die Hagelkörner unter Umständen viele Male nach unten und wieder nach oben gerissen. Bei jedem Umlauf bildet sich dabei eine neue Eisschicht, und die Dicke nimmt weiter zu. Wenn die Aufwinde in der Gewitterwolke nicht mehr stark genug oder die Eiskörner zu groß und schwer geworden sind, fallen sie als Hagel zu Boden, sofern sie auf dem Weg nicht geschmolzen sind.

3.1.2 Die Hagelintensität

Die Intensität von schweren Hagelgewittern ist aufgrund ihrer komplexen physikalischen Eigenschaften schwierig darzustellen. Relevante physikalische Charakteristika von Hagelstürmen zur Beschreibung der Intensität sind nach LEIGH (1998) (1) die Anzahl der Hagelkörner pro Quadratmeter, (2) die Größe und Dichte der Hagelkörner, (3) die lokalen Windgeschwindigkeiten und (4) die Geschwindigkeit der Hagelkörner beim Aufprall. Diese (4) steht in enger Korrelation mit der Masse, Größe, Form und Oberfläche des Hagelkorns.

Die „Tornado and Storm Research Organisation“ (TORRO) in Großbritannien kommt in der Studie von WEBB et al. (2001) zu ähnlichen Ergebnissen und nennt folgende Parameter: (1) Hagelkorngröße (Verteilung und maximale Größe), (2) Textur, (3) Anzahl, (4) Fallgeschwindigkeit des Hagelkorns, (5) Geschwindigkeit des Sturmes und (6) die Stärke der im Sturmsystem vorherrschenden Winde.

Die Intensität dient dabei vor allem der potenziellen Schadeneinschätzung. Nach TORRO wurde eine Hagelsturm-Intensitätsskala entworfen, die die physikalischen Eigenschaften, einen Intensitätsfaktor (H) und den potenziellen Schaden in Relation wiedergibt (Anhang B). Dabei ist wichtig zu erwähnen, dass die Hagelkorngröße, die zwar die größte Bedeutung für die potenzielle Schadeneinschätzung hat, allein nicht ausreicht, um die Intensität und den potenziellen Schaden genau abzubilden. Wie aus den Abbildungen in Anhang B ersichtlich, wird jede Hagelkorngröße mit einem Intensitätsbereich versehen. Zum Beispiel würde ein Hagelereignis mit Hagelkörnern, die einen Durchmesser von bis zu 30 mm haben, einer Hagelkorngröße von 4 entsprechen und demnach als ein Hagelsturm mit einer minimalen Intensität von H2 eingestuft werden. Zusätzliche Informationen wie Windgeschwindigkeiten zeichnen ein sehr viel schärferes Bild vom Hagelereignis. Hagelkörner mit der Größe einer Walnuss würden bei einer geringen Windgeschwindigkeit eventuell Pflanzenteile beschädigen, Windschutzscheiben von Kraftfahrzeugen jedoch nicht durchschlagen und damit einer Intensität von H2-3 zugeordnet werden. Walnussgroße Hagelkörner, begleitet von starken Winden, könnten dagegen Fensterscheiben zerschlagen oder große Dellen an Kraftfahrzeugen verursachen und somit als Hagelereignis mit einer Intensität von H5 eingestuft werden. Schon CHANGNON (1971b) beschrieb in seiner Studie über den Wind-Faktor bei der Schadenbetrachtung an Nutzpflanzen, dass schwere Schäden nur bei gleichzeitigem Auftreten von starken Winden vorkamen. MORGAN und TOWERY (1976) schätzen den Schaden bei starken Winden auf bis zu fünfmal so hoch ein wie in Abwesenheit von Winden.

Der gewöhnlichste Indikator zur Abbildung der Intensität ist heute die Verwendung der kinetischen Hagelenergie (VINET, 2001). Dieser Indikator wird bevorzugt verwendet, da er synthetisch erstellt wird und leicht zu berechnen ist. Abgeleitet von Hagelmatten-Daten integriert die kinetische Energie die Anzahl der Hagelkörner pro Quadratmeter, ihren Durchmesser sowie ihre Fallgeschwindigkeit.

Abgeleitet von Radarreflektivitätsmessungen kann die kinetische Energie in Gewittern berechnet werden. HOHL et al. (2002) haben in ihrer Studie Hagelschadendaten an Kraftfahrzeugen von Versicherungen mit der von Niederschlagsradaren abgeleiteten kinetischen Energie verglichen. Dabei kommen sie zu dem Ergebnis, dass ein nicht-linearer Zusammenhang zwischen der kinetischen Energie und dem Schaden an Kraftfahrzeugen besteht. Sowohl die prozentuale Schadensumme als auch der durchschnittliche Schaden pro Kraftfahrzeug weisen einen hohen Korrelationskoeffizienten auf. Eine kinetische Energie von 1000 J/m^2 , welche ein starkes Hagelgewitter repräsentiert, würde im hagelreichen Zeitraum von Mitte Juni bis Mitte August (HOHL et al., 2002; vgl. Kap. 3.1.6) (bzw. in der Zeit davor und danach) einen Schaden verursachen, der 50 % (bzw. 35%) der versicherten Summe der in diesem Gebiet exponierten Kraftfahrzeuge entspräche. Die unterschiedlichen prozentualen Schadensummen verdeutlichen aber auch, dass die kinetische Energie nicht allein dafür ausreicht, die Intensität genau abzubilden. Und auch wenn die kinetische Energie ein wertvoller Parameter für die Hagelintensität ist, so kann umgekehrt kein Rückschluss auf andere Hagelparameter wie die Größe der Hagelkörner oder die Dauer des Hagelgewitters getroffen werden.

WOJTIW und RENICK (1973) untersuchten mit Hilfe von 2.000 ausgewerteten Hagelberichten die Korrelation verschiedener Hagelvariablen. Danach wird der höchste Korrelationskoeffizient zwischen dem Hagelschaden und der kinetischen Energie der Hagelkörner erzielt. Die enge Beziehung zwischen der kinetischen Energie, der Aufschlaggeschwindigkeit der Hagelkörner und dem Hagelkorndurchmesser wird in Abbildung 7 veranschaulicht.

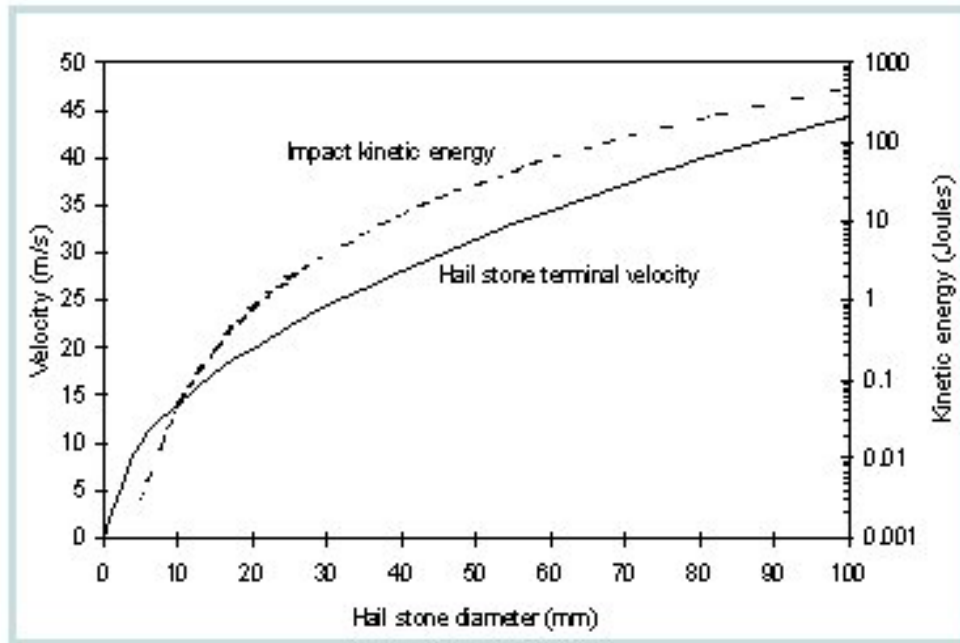


Abbildung 7: Theoretische Beziehungen zwischen der kinetischen Energie, der Aufschlaggeschwindigkeit der Hagelkörner und dem Hagelkorndurchmesser (Quelle: LEIGH, 1998)

Die Aufschlaggeschwindigkeit eines Hagelkorns steht in komplexer Relation mit Gewicht, Größe, Form und Oberfläche eines Hagelkorns. Die Aufschlaggeschwindigkeiten verschieden großer Hagelkörner verhalten sich zueinander wie die Quadratwurzel ihrer Durchmesser: Sie liegt für ein 1-cm Korn bei etwa 50 km/h, für ein 5 cm Korn schon bei 110 km/h und für ein 14 cm Korn sogar bei 170 km/h (MÜNCHENER RÜCK, 1984). Aufgrund seines Gewichts und seiner Geschwindigkeit besitzt ein Hagelkorn viel kinetische Energie, die beim Aufprall auf ein Kraftfahrzeug zu einer Verformung der Oberfläche führt. Dabei resultiert der größte Schaden aus einer plastischen Deformierung der Karosserie sowie dem Zerspringen der Windschutzscheiben. Der Schaden am Kraftfahrzeug steigt dabei mit zunehmender Hagelkorngröße bis zu einem gewissen Schwellenwert nur leicht an. Ab einem Durchmesser von > 20 mm wächst das Schadenpotenzial bis zum Totalschaden des Kraftfahrzeugs dann exponentiell an (HOHL et al., 2002; BRIMELOW et al., 2002).

Ein extremes Hagelereignis wird an dieser Stelle deshalb als ein Hagelgewitter, in dem das größte am Boden gemessene Hagelkorn einen Durchmesser von 20 mm überschreitet, definiert.

Hagelgewitter mit Hagelkörnern < 20 mm, die kleinere bzw. gar keine Schäden hervorrufen, werden in dem Hagelschadenmodell zwar ebenfalls simuliert, finden später bei der Schadenberechnung jedoch keine Berücksichtigung.

3.1.3 Über die Intensität und Ausdehnung von Hagelstrichen und Hagelzügen

Innerhalb eines Hagelgewitters kommt es nicht auf der gesamten Fläche zum Hagelfall. Wenn Hagelgewitter sich fortbewegen, produzieren sie Hagel, der am Boden zu charakteristischen Hagelmustern führt. Eine Einheit stellt dabei der Hagelstrich dar, der nach SCHIESSER (1988) als eine abgrenzbare Region mit Hagelfall, welche einen oder mehrere Hagelzüge enthält, die voneinander nicht mehr als 30 km entfernt sind und innerhalb von 12 Stunden oder weniger verursacht wurden, definiert wird. Er kann aus verschiedenen Hagelzellen innerhalb eines Hagelgewitters entstehen, welche das gleiche Gebiet innerhalb einer gewissen Zeitspanne durchqueren. Ein Hagelzug stellt ein Gebiet mit kontinuierlichem Hagelschlag in Raum und Zeit in einem Hagelstrich dar. Die Hagelmuster am Boden sind zudem geprägt durch Zonen höherer und niedriger Intensität. WEBB et al. (2001) untersuchten die geographische Verteilung der maximalen Hageldurchmesser eines starken Hagelgewitters in England. Dieses zeichnete sich durch zwei parallel verlaufende Hagelstriche aus, die am Ende miteinander verschmolzen (Abb. 8). Jeder Hagelstrich wies ein Zentrum mit erhöhter Intensität auf: der westliche Hagelstrich mit Hagelkorndurchmessern von bis zu 50 mm und der östliche mit bis zu 30 mm. Nach der Verschmelzung entwickelte sich ein Hagelzentrum mit Hagelkorndurchmessern bis zu 30 mm.

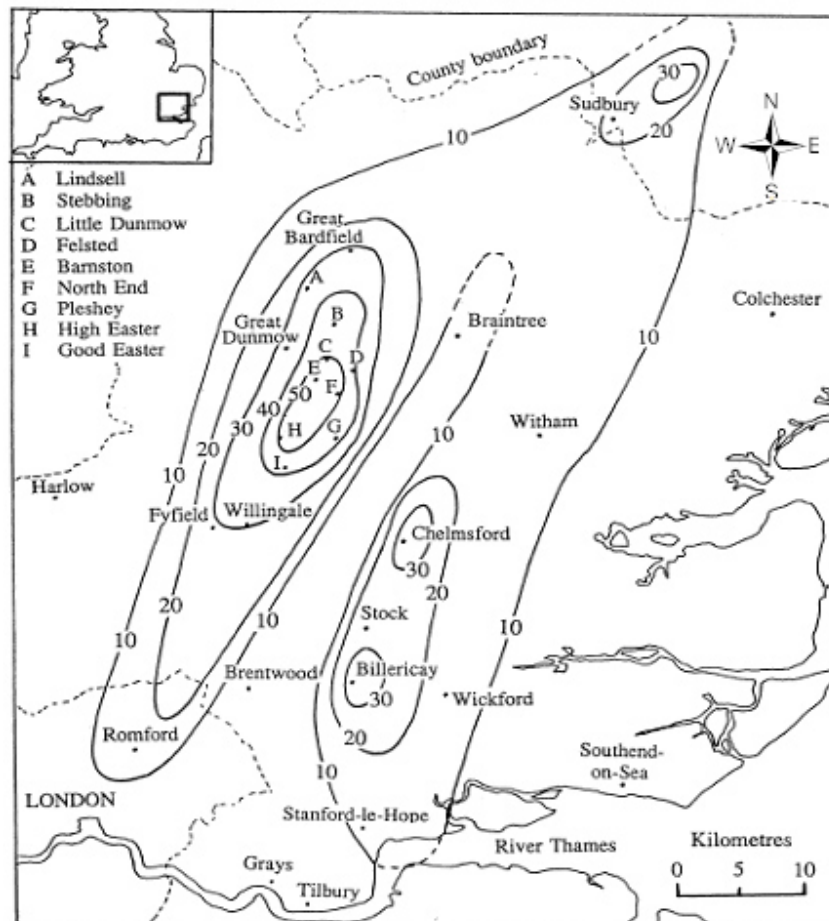


Abbildung 8: Hagelgewitter am 26. Mai 1985 in England; Die Isolinien stellen den maximal nachgewiesenen Hagelkorndurchmesser dar (Quelle: WEBB et al., 2001)

Die Erkenntnis, dass im zentralen Teil eines Hagelstriches die größten Hagelkörner produziert werden bzw. die höchste Intensität vorgefunden werden kann, hat bereits SÜRING (1939) bei der Untersuchung von Hagelgewittern in Süddeutschland Anfang des 20. Jahrhunderts festgestellt. Er berichtet jedoch auch, dass „nicht selten einzelne besonders große Eisstücke gewissermaßen über den Rand der Bahn hinausgeschleudert werden“.

Diese Ergebnisse werden durch die Studie von HOHL et al. (2002) bekräftigt. Der in Abbildung 9 dargestellte Hagelsturm ereignete sich am 10. August 1994 und zog über das Mittelland der Schweiz hinweg. Mittels Niederschlagsradaren wurde die kinetische Energie gemessen und in drei Intensitätszonen unterteilt. Dabei wird ersichtlich, dass sich mehrere kleine Zentren höherer kinetischer Energie und ein größeres Zentrum in der Mitte des Hagelzugs gebildet haben. Anhand der Anzahl der beschädigten Kraftfahrzeuge kann man erkennen, dass insbesondere in dem Bereich der größten Ansammlung kinetischer Energie in der Mitte des Hagelstriches die

meisten Kraftfahrzeuge beschädigt wurden. Jedoch fällt auch auf, dass außerhalb des Vierecks, in dem die kinetische Energie stark mit dem Schaden korreliert, in vielen Gemeinden ebenfalls vermehrt Schäden an Kraftfahrzeugen verzeichnet wurden.

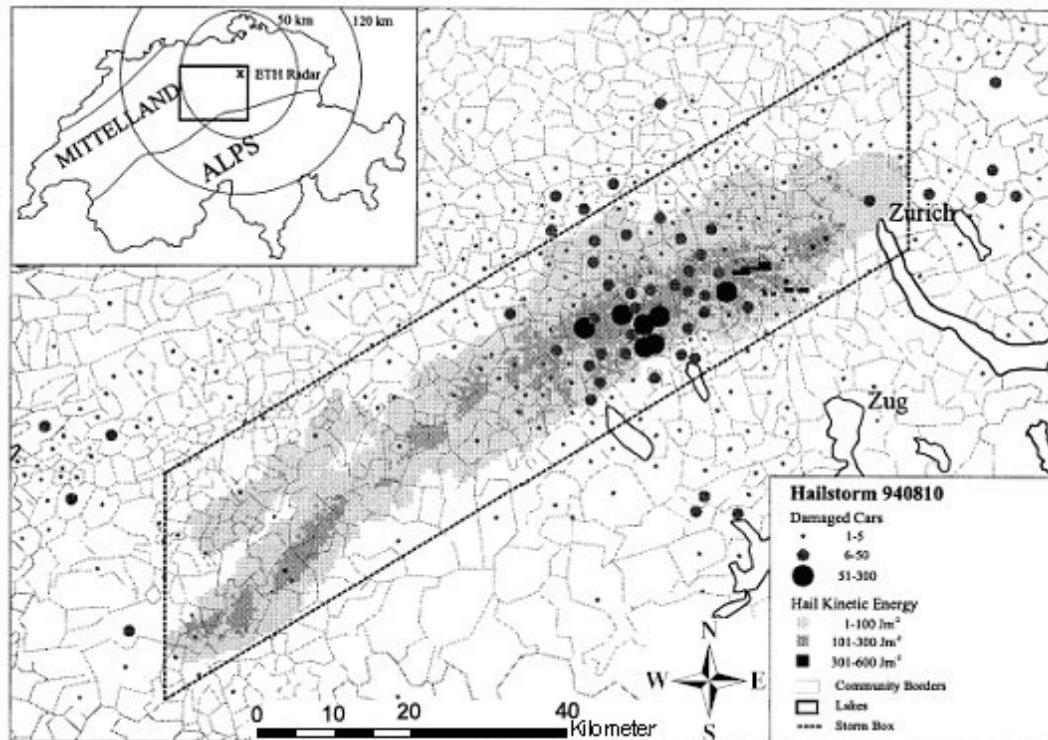


Abbildung 9: Übersichtskarte der Schweiz (oben links) mit dem Standort des Radars (Kreuz), dem Erfassungsgebiet des Radars (Kreise) und dem vergrößert dargestellten Kartenausschnitt (Rechteck). Die in der Box dargestellte kinetische Energie wird in grau schattierten Farben wiedergegeben, die Anzahl der beschädigten Kraftfahrzeuge ist an der Größe der Kreise zu erkennen (Quelle: HOHL et al., 2001)

GOKHALE (1975) vergleicht in seiner wissenschaftlichen Studie Hagelstriche und Hagelzüge unterschiedlicher Felduntersuchungen. In der Darstellung eines Hagelstrichs vom 16. Mai 1966 in Oklahoma stechen sechs Zentren hoher Intensität mit golfballgroßen Hagelkörnern hervor, die überwiegend in der Mitte des Hagelstrichs liegen. Die Hagelkorngröße nimmt zu den Flanken hin kontinuierlich ab.

Die von Hagelstrichen verursachten Hagelmuster am Boden sind niemals die gleichen, da die mikroklimatischen Verhältnisse und geographischen Gegebenheiten den Hagelfall stark beeinflussen. So führt z.B. nach BROWNING (1977) ein starker Wechsel der Auf- und Abwinde in hügeligem Gelände auch zu einem raschen Wechsel zwischen Hagelentstehung und Aushageln im Verlauf eines Hagelgewitters.

Dies hat zur Folge, dass der Hagelfall in unregelmäßigen Abständen aussetzen kann. Die Pause eines Hagelfalls kann nur wenige Sekunden lang sein, manchmal sind es aber auch mehrere Minuten. In der Regel gibt es nur ein bis zwei Hagelfälle. Die Häufigkeit von drei oder mehr Hagelfällen ist sehr gering (GOKHALE, 1975). Hagelstriche enthalten deshalb meist auch hagelfreie Zonen, so dass sich der Hagelstrich aus mehreren Hagelzügen unterschiedlicher Intensität zusammensetzt.

Trotzdem haben Hagelstriche fast immer eines gemeinsam:

- 1) im zentralen Teil eines Hagelstriches ist die Intensität am größten
- 2) zu den Seiten nimmt die Intensität ab
- 3) Anfang und Ende eines Hagelstrichs haben eine geringe Intensität
- 4) ein Hagelstrich besteht aus mehreren Hagelzügen
- 5) der Hagelfall ist unterbrechend und nicht stetig

Um den ersten drei Punkten auch in der Modellierung gerecht zu werden, werden bei der Simulation der Hagelereignisse dem Hagelstrich zwei Zonen unterschiedlicher Intensität zugewiesen. Eine Kernzone hoher Intensität und eine Randzone niedriger Intensität. Die zuletzt genannten Punkte sind dagegen nur schwierig in das Modell zu integrieren. Zum einen ist wissenschaftlich noch nicht eindeutig geklärt, welche Faktoren dazu beitragen, dass der Hagelfall plötzlich einsetzt, dann wieder aufhört und sich so Unterzentren erhöhter Hagelintensität formieren. Zum anderen benötigt man zur Simulation solch kleinräumig stark variierender Phänomene eine extrem gute Datenbasis.

Ein Hagelstrich kann in seiner Ausdehnung beträchtliche Größenordnungen annehmen. Wie weit sich ein Hagelstrich über das Land erstreckt, hängt vom Typ und der Intensität des Gewitters ab. Insbesondere Superzellengewitter zeichnen sich durch schwere Hagelschläge mit großen Hagelkörnern und lang gezogenen Hagelstrichen aus und verursachten in der Vergangenheit die großen Hagelkatastrophen; wie z.B. das Münchener Hagelunwetter vom 12. Juli 1984. Dessen Haupthagelstrich fand seinen Ursprung bei Ravensburg nahe dem Bodensee, zog über den Lech bei Landsberg, den Ammersee, den Münchner Raum, entlang des Inns bis zur Landesgrenze und erreichte im deutschen Bereich eine Länge von fast 250 km und eine Breite von 5-15 km (KURZ, 1986). Insgesamt umfasste der Hagelstrich eine Gesamtlänge von über 300 km (Abb. 10). Daneben traten weitere

kleinere Nebenereignisse auf, die demselben Gewittersystem angehörten, jedoch weder die Größe noch die Intensität des Hauptereignisses erreichten.

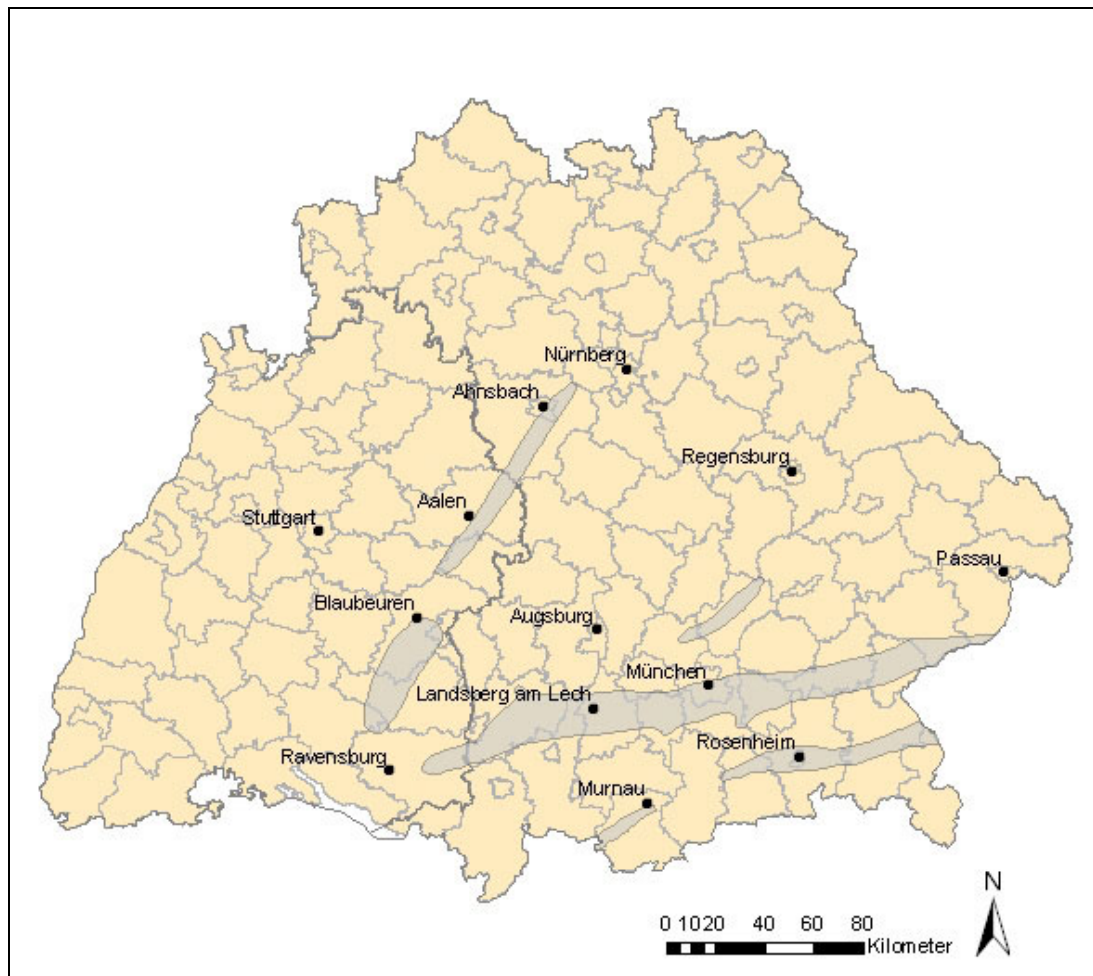


Abbildung 10: Große Hagelzüge während des Münchener Hagelunwetters vom 12. Juli 1984 (verändert nach: DEUTSCHER WETTERDIENST)

Extreme Hagelereignisse, die eine Länge von 300 km und mehr erreichen, sind äußerst selten. Es gibt Quellen, die von ähnlichen außergewöhnlichen Hagelereignissen berichten. WEBB et al. (2001) erwähnen einen Hagelsturm, der eine Länge von 335 km und eine Breite von 16 km hatte, MORGAN (1998) berichtet von einem Hagelunwetter in Kanada mit einer Länge von über 320 km und einer Breite von 30-40 km und CHANGNON u. BURROUGHS (2002) gar von einem 585 km langen Hagelsturm in den USA.

Hagelgewitter weisen in ihrer Länge und Breite eine äußerst hohe Variabilität auf. KLEINSCHROTH (1999) rekonstruierte aus Hagelschadenmeldungen in Bayern 1681 Hagelgewitter und berechnete ihre Flächen, Breiten und Längen (Anhang C).

Im Mittel beträgt die Länge eines Hagelgewitters 82 km, hat jedoch eine Standardabweichung von 58 km. Die maximale Länge liegt bei 332 km, die minimale bei 6 km. Die Breiten der Hagelgewitter schwanken zwischen 0,2 und 28 km und haben einen Mittelwert von 6 km (Standardabweichung 4 km). Die hohe Standardabweichung unterstreicht die hohe Variabilität der Hagelgewitterlängen und -breiten. Trotz der hohen Variabilität besteht ein Zusammenhang zwischen diesen beiden Parametern. Bei einem Vergleich der Längen und Breiten der 50 stärksten Hagelstürme in Großbritannien (WEBB et al., 2001) geht hervor, dass die Spannbreite der Hagelstrichlängen und -breiten ebenfalls sehr hoch ist und eine schwache Korrelation vorliegt. Dies verdeutlicht, dass die Berücksichtigung dieser Korrelation für die Simulation der Hagelereignisse von Bedeutung ist, um z.B. unmögliche Hagelausdehnungen, wie z.B. Hagelereignisse mit einer Länge von 10 km und einer Breite von 20 km, die aus meteorologischer Sicht nicht entstehen können, auszuschließen. Daher wurden auf der Basis der Längen- und Breitenangaben der 1681 Hagelstürme in Bayern, die für die Simulation der Hagelereignisse in ganz Deutschland übernommen werden können, zwei voneinander abhängige Verteilungsfunktionen entwickelt.

Es existieren, wie im vorherigen Kapitel erwähnt, eine Reihe von Parametern, die die Intensität eines Hagelsturms beschreiben: Maximale oder durchschnittliche Hagelkorngröße, Länge und Dichte des Hagelfalls, maximale oder durchschnittliche Windgeschwindigkeit oder die kinetische Energie. Jeder dieser Faktoren kann zu Schaden führen. Die maximale Hagelkorngröße wird in der Modellierung häufig zur Darstellung der Intensität genutzt, da dieser Parameter eine einfach zu messende Einheit ist und der Zusammenhang zwischen Hagelintensität und Schaden bereits seit langem untersucht wird. Zudem ist bekannt, dass zwischen der Hagelkorngröße und der Hagelsturmgröße eine positive Korrelation besteht und diese ein „gut dokumentiertes Phänomen ist“ (KILLMIER, 2005). Das bedeutet, dass mit wachsender Hagelsturmgröße auch die Schäden an den Kraftfahrzeugen steigen werden, da der Kraftfahrzeugschaden mit zunehmender Hagelkorngröße anwächst. Die von WEBB et al. (2001) untersuchten 50 stärksten Hagelstürme Großbritanniens bestätigen die Verbindung zwischen intensivem Hagelfall und von starken Winden begleiteten langen Hagelgewittern. Eine Analyse der Hagelstürme, die die Intensität H3 oder größer (Anhang B) zwischen 1950 und 1999 erreichten, wiesen eine Länge

von 20 km oder mehr auf. Hagelstürme im gleichen Zeitraum mit einer Intensität von H5-6 hatten sogar eine Länge von 35 km und mehr.

Das australische Hagelmodell HailAUS nutzt diesen Zusammenhang bei der Berechnung der Intensität, die den synthetisch erstellten Hagelereignissen zugewiesen wird (LEIGH u. KUHNEL, 2001). HailAUS ist ein stochastisches Hagelschadenmodell für die urbanen Regionen im Westen Australiens, das Schäden an Kraftfahrzeugen, Gebäuden und Gebäudeinhalten abschätzt. Die Hagelkorngröße und die Anzahl der betroffenen PLZ-Gebiete sind über eine bivariate Verteilungsfunktion miteinander verknüpft. In Testdurchläufen wurde ein hoher positiver Korrelationskoeffizient zwischen der Anzahl der betroffenen PLZ-Gebiete (also der Hagelsturmgröße) und der maximalen Hagelkorngröße ermittelt. Zusammen mit der unabhängig generierten Variablen der maximalen Windgeschwindigkeit bildet die maximale Hagelkorngröße die Intensität eines Hagelereignisses ab.

Mit einer ähnlichen Methode soll das Hagelschadenmodell für Deutschland arbeiten. Da zu diesem Zeitpunkt weder Daten über Hagelkorngrößen noch Windgeschwindigkeiten vorliegen, müssen vereinfachte Annahmen getroffen werden. Die wesentliche Annahme ist, dass mit wachsender Hagelsturmgröße die Höhe des durchschnittlichen Kraftfahrzeugsschadens ansteigt. Die Intensität eines Hagelsturms wird demzufolge durch den Durchschnittsschaden ausgedrückt. In welcher Form der Zusammenhang dieser beiden Parameter besteht, ist jedoch nicht exakt bekannt, da nur wenige Hagelstürme mit bekannten Größen vorliegen. Einer von diesen ist der Münchener Hagel von 1984, der als extremes Hagelereignis sowohl meteorologisch genau analysiert wurde als auch die finanziellen Folgen für die Versicherungen, Rückversicherungen und Volkswirtschaft genauestens untersucht wurden. Die MÜNCHENER RÜCK (1984) gibt eine Zuglänge von 300 km und eine Schadenfläche von 1.500 km² an. Der durchschnittliche Kraftfahrzeugschaden lag damals bei 3.300 DM. In Anlehnung an die Preissteigerung bei Reparaturkosten, Ersatzteilen und Neuwagen läge der heute zu erwartende Schadendurchschnitt bei ca. 3.500 €.

Bei Hagelstürmen, deren Fläche sehr klein ist, wird angenommen, dass es sich bei diesen um lokale Wärmegewitter oder Nebenereignisse handelt, die größtenteils Hagelkörner geringer Größe – also < 20 mm – produzieren und somit keinen

Schaden verursachen. Damit soll nicht ausgeschlossen werden, dass auch kleine Hagelereignisse mitunter zu Schäden an Kraftfahrzeugen führen können.

Mit einer größer werdenden Hagelsturmfläche steigt nicht nur der durchschnittliche Schaden, sondern auch die Anzahl der beschädigten Kraftfahrzeuge nimmt zu. Dies ist auf verschiedene Gründe zurückzuführen: Mit zunehmender Hagelkorngröße verändert sich nicht nur die Höhe des Schadens sondern auch die Anzahl der beschädigten Kraftfahrzeuge. Nennenswerte Schäden werden erst ab einer Hagelkorngröße von 20 mm und mehr verursacht. Dies ist jedoch stark vom Baujahr und Typ des Kraftfahrzeugs abhängig. So ist z.B. anzunehmen, dass ein Wohnmobil, das von einem Hagelschlag mit einer maximalen Hagelkorngröße von 30 mm getroffen wird, kaum beschädigt wird, wohingegen ein kleiner Personenkraftwagen wegen Dellen in der Karosserie in die Werkstatt fahren müsste. Dieser Faktor wird ab einer bestimmten Hagelkorngröße keinen großen Einfluss mehr ausüben. Ab 40-50 mm kann damit gerechnet werden, dass jedes Kraftfahrzeug beschädigt wird.

Ein weiterer Aspekt ist, dass mit dem Anwachsen der Hagelsturmfläche der Anteil der Fläche, auf der Hagel fällt, ansteigt. Dies hängt damit zusammen, dass zum einen die Wahrscheinlichkeit steigt, dass noch ein zweiter Hagelzug über einen Punkt am Boden hinwegzieht, und zum anderen mit der längeren Hagelfalldauer. So ist in einem Superzellengewitter, das eine Zuglänge von 300 km hat, die Wahrscheinlichkeit weitaus größer, dass ein Kraftfahrzeug beschädigt wird als bei einem Wärmegewitter von 10 km Länge.

Die Anzahl der von einem Hagelsturm beschädigten Kraftfahrzeuge in Relation zu der Gesamtzahl der diesem Hagelsturm exponierten Kraftfahrzeuge wird durch den Betroffenheitsgrad ausgedrückt. Dieser ist aber nicht nur von der Größe eines Hagelgewitters abhängig sondern auch temporal (ausführlich in Kap.3.1.6.5) und geographisch bedingt. Der Betroffenheitsgrad wird bei der Modellierung auch berücksichtigt und wird als eine Funktion, die mit der Hagelsturmfläche korreliert, dargestellt. Zudem unterscheidet sich der Betroffenheitsgrad der Kernzone und der Randzone eines Hagelgewitters. Im zentralen Teil eines Hagelsturms ist nicht nur die Dauer des Hagelfalls länger sondern auch die Größe der Hagelkörner, so dass die Anzahl der beschädigten Kraftfahrzeuge in der Kernzone weitaus größer ist.

Die geographische Variabilität des Betroffenheitsgrades kann von Region zu Region sehr stark schwanken. Während z.B. Kraftfahrzeugbesitzer in Grünwald bei München ihren Wagen in der Garage unterstellen können, sind in vielen anderen

ländlichen Regionen Deutschlands die Kraftfahrzeuge auf der Auffahrt oder an der Straße geparkt. Ähnlich verhält es sich mit städtischen und vorstädtischen Regionen. Nach LEIGH u. KUHNEL (2001) parken 70 % der Kraftfahrzeugbesitzer, die ihren Wohnsitz im nahen Stadtumland haben, ihren Wagen sicher vor Hagel in der Garage oder unter dem Carport, während im weiteren Stadtumland weniger als 3 % der Kraftfahrzeuge geschützt stehen. Auch wenn sich mit diesen Angaben nur ein grobe Schätzung des Schutzfaktors machen lässt, so wird trotzdem ersichtlich, wie stark die geographische Verteilung der Kraftfahrzeuge den Betroffenheitsgrad beeinflussen kann. Für eine genauere Betrachtung und eine mögliche Implementierung in das Modell ist es denkbar, die Anzahl der Kraftfahrzeuge pro Haushalt und Wohnungstyp zu ermitteln, um mit diesen den Schutzfaktor darzustellen.

3.1.4 Räumliche Variabilität von Hagelereignissen

Die höchsten Hagelhäufigkeiten lassen sich in Regionen erwarten, in denen trockenkalte und feuchtwarme Luftmassen häufig aufeinander stoßen; also Gebiete mit klimatischen Bedingungen, wie sie ausführlich in Kapitel 3.1.1 beschrieben wurden. Hagelstürme tauchen deshalb meist in den mittleren Breiten auf. Ihre Häufigkeit nimmt zu den Polarregionen hin ab. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in kalten Klimaten die fehlende Luftfeuchtigkeit die Bildung von Wolken einschränkt. Eine generell geringere Hagelbildung findet über den Ozeanen statt, weil eine intensive Aufheizung der Wasseroberfläche zur Entwicklung von starken Aufwinden zur Bildung von großen Hagelkörnern fehlt. Der Entwicklung von Hagel in den Tropen wurde bisher nur eine untergeordnete meteorologische Bedeutung zugemessen. Es verwundert daher nicht, dass GOKHALE (1975) aufgrund der hohen Temperaturen in den unteren Bereichen der Wolke ein schnelles Schmelzen der Hagelkörner annimmt, was zu einer geringeren Hagelbildung führt, während FRISBY u. SANSOM (1967) dagegen keine nennenswerten Gründe dafür finden, warum in den Tropen die Hagelgefährdung geringer sein sollte als in den mittleren Breiten. Die größten zusammenhängenden Gebiete mit einer hohen Hagelgefährdung in der nördlichen Hemisphäre sind die Great Plains in Nordamerika, die sich von den kanadischen Provinzen Alberta und Saskatchewan südlich in Richtung Nebraska, Colorado und Kansas bis nach Oklahoma und Texas erstrecken (vgl. CHANGNON, 1984), sowie Russland, Zentral- und Nordindien, China und Europa (MORGAN,

1998). In der südlichen Hemisphäre sind die am stärksten betroffenen Gebiete die argentinische Pampa, Kenia und Südafrika (GOKHALE, 1975). Regionen in Europa mit einer hohen Anzahl von Hagelstürmen liegen meistens in den Abwindzonen hoher Gebirge. Da wären vor allem Süddeutschland, Norditalien (vgl. GIAIOTTI et al. 2003), Frankreich (vgl. VINET 2001), Österreich und die Schweiz in der Nähe der Alpen zu nennen, Südfrankreich und Nordspanien nahe der Pyrenäen (vgl. FRAILE et al., 2003), Nordgriechenland im Pindos Gebirge (vgl. SIOUTAS u. FLOCAS, 2003) sowie Südschweden und Großbritannien (vgl. WEBB et al., 2001). Eine generalisierte Hagelgefährdungskarte von Zentraleuropa, die fünf Klassen von I (geringe Gefährdung) bis V (hohe Gefährdung) umfasst (Abb. 11), bestätigt die zuvor getroffenen Aussagen.

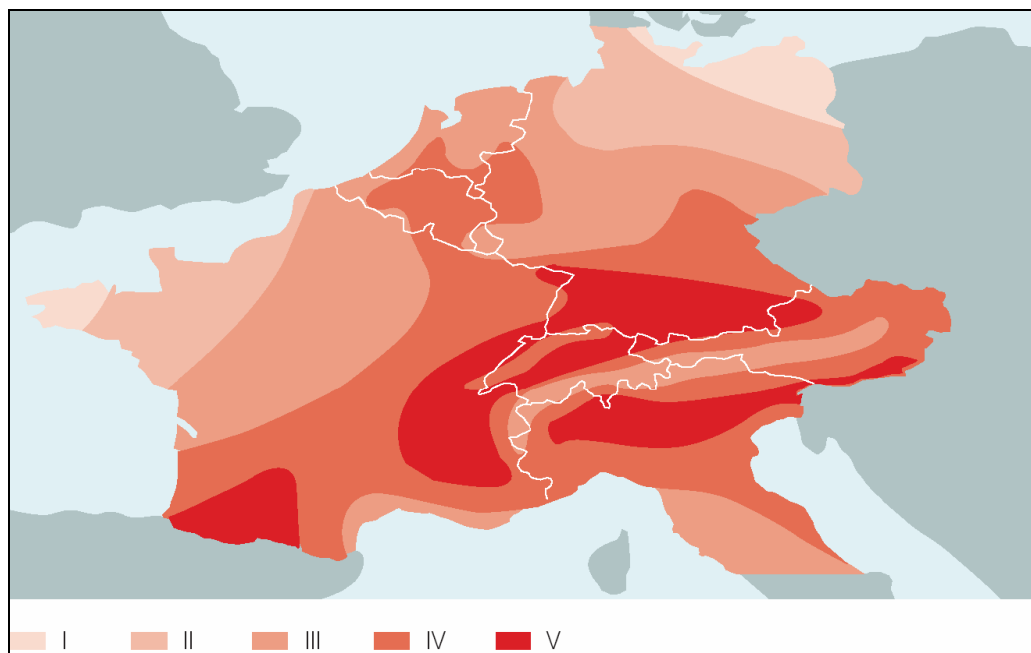


Abbildung 11: Hagelgefährdung in Mitteleuropa (Quelle: SWISS RE)

Wie man Abbildung 11 entnehmen kann, nimmt die Hagelgefährdung in Deutschland von Süden nach Norden kontinuierlich ab. Während Bayern und Baden-Württemberg die Hagelgefährdungsklasse IV-V erreichen, sind die Küstenstriche Schleswig-Holsteins und Mecklenburg-Vorpommerns nur gering von Hagel gefährdet. Die hohe Hagelfrequenz im Süden Deutschlands macht diese Region zu einem hervorragenden Untersuchungsgebiet, da das seltene und lokal auftretende Naturphänomen Hagel dort besonders gut erforscht werden kann (vgl. Kap. 3.1.5).

Deshalb sind insbesondere in der älteren Literatur überwiegend Einträge über Hagelereignisse aus Bayern und Baden-Württemberg zu finden (vgl. SCHMITTLERMAN, 1984).

Betrachten wir Abbildung 1, die die Hagelgefährdung in Deutschland nach Gemeinden unterscheidet, so variiert die durchschnittliche jährliche Anzahl von Hageltagen in Deutschland überwiegend zwischen 0 und 4 Tagen. Wobei anzumerken ist, dass es in einer Gemeinde wirklich nie hagelt bzw. gehagelt hat, äußerst unwahrscheinlich ist. Ein Hageltag ist definiert als ein Tag, an dem Hagel an einer Messstation bzw. ein Hagelschaden einer Versicherung gemeldet wurde. Es spielt dabei keine Rolle, zu welcher Tageszeit das Hagelereignis eintrat oder welche maximale Hagelkorngröße gemessen wurde noch wird irgendeine andere meteorologische Information damit in Verbindung gebracht.

Diese Abbildung gibt keinen Aufschluss darüber, ob in einer Gemeinde, in der es oft hagelt, auch schwere Schäden durch Hagel eingetreten sind. Ein Rückschluss auf die Intensität der Hagelgewitter kann also nicht getroffen werden. Zu dieser Erkenntnis ist man gelangt, nachdem Karten von Hagelhäufigkeiten mit Karten, die den jährlichen Durchschnittsschaden abbilden, verglichen wurden (MÜNCHENER RÜCK, 1997). Demnach lassen sich große Unterschiede in der räumlichen Verteilung feststellen: Während sich an der Karte der Hagelhäufigkeiten die Einflüsse räumlicher Gegebenheiten, die kleine und mittlere Hagelereignisse beeinflussen, ablesen lassen, zeigt die Schadenkarte deutlich die Pfade schwerer Hagelstürme mit hohen Schadenssummen.

Im Vergleich der Abbildungen 1 und 11 können wir große Gemeinsamkeiten feststellen: eine hohe Hagelgefährdung in Süddeutschland und Nordrhein-Westfalen und eine geringe Hagelgefährdung im Osten sowie im Norden Deutschlands. Die äußerst geringe Hagelgefährdung in den neuen Bundesländern in Abbildung 1 entspricht sicherlich nicht der Realität, sondern dürfte auf eine geringe Versicherungsdeckung zurückzuführen sein. Diese Karte spiegelt sehr anschaulich die hohe räumliche Variabilität von Hagelereignissen wider: Gemeinden mit hoher Hagelgefährdung wechseln sich mit Gemeinden sehr niedriger Hagelgefährdung ab. Das kann mehrere Gründe haben: Lokale Hagelschläge sind stark von mikroklimatischen Prozessen und den geographischen Gegebenheiten abhängig, was zu starken Unterschieden in der Hagelgefährdung selbst zwischen benachbarten Gemeinden führen kann. Ein ähnliches Bild ergibt sich, wenn Gemeinden mit einer

geringen Versicherungsdeckung an Gemeinden mit hoher Versicherungsdeckung grenzen, so dass bei einem Hagelfall, der beide Gemeinden gleich träfe, die Wahrscheinlichkeit, dass der Hagelfall registriert wird, in der Gemeinde mit der hohen Versicherungsdeckung weitaus größer ist. Eine weitere Erklärung könnte sein, dass Gebiete mit relativ hagelunempfindlichen Kulturen (Grasland, kein Ackerbau) benachbart zu Gemeinden mit hagelempfindlichen Kulturen (Weizen, Roggen, Mais) liegen. Zudem ist die Periode von 1990-1996, auf der die Datenbasis beruht, für die Darstellung eines langjährigen Mittels immer noch sehr kurz.

Abbildung 11 bietet dem Betrachter keine so differenzierte Darstellung der Hagelgefährdung und vernachlässigt die kleinräumige Variabilität. Sie spiegelt dadurch aber die synoptischen atmosphärischen Einflüsse besser wider, die die Hagelbildung beeinflussen. In Mitteleuropa verlaufen großflächige Hagelzüge vorwiegend von Südwesten nach Nordosten. Die erkennbaren Hagelbänder liegen in ausgesprochener SW-NE-Richtung über Mitteleuropa und lassen die Übereinstimmung der mittleren Zugrichtung mit der vorherrschenden Drift der Höhenströmung aus SW bis WSW erkennen.

SCHWIND (1957) hat in seiner Studie über die regionale Verteilung der Hagelhäufigkeit in Deutschland ebenfalls Bänder größter Hagelhäufigkeit in ausgesprochener SW-NE-Richtung nachgewiesen. Er greift dabei auf eine fast lückenlose 30-jährige Periode über Hagelschadenmeldungen aller Feldmarken des alten Deutschen Reiches für die Jahre 1912-1941 zurück, die auf Gemeindeebene aufgezeichnet wurden. Die fünf Klassen der Hagelhäufigkeiten, ausgedrückt in Hagelschadensjahren, werden durch Isochalazen (grch. chalaza >>Hagel<<), Linien gleicher Hagelhäufigkeit, dargestellt. Ein Hagelschadensjahr wird als ein Jahr verstanden, in dem Hagel in einer Gemeinde Schaden verursacht hat, unabhängig von der Häufigkeit der Hagelfälle in dem betrachteten Jahr. In der Karte (Anhang D) lassen sich fünf Hagelbänder von verschiedenem Gewicht erkennen. Im Allgemeinen weisen die südlichen Hagelbänder eine größere Häufung auf als die nördlichen. Dafür dehnen sich die nördlichen weiter nach Osten hin aus. Hagelband I setzt in der Oberrhein-Ebene ein, lässt darauf den ganzen Raum des Schwarzwaldes mit Ausnahme weniger Durchlässe frei, um an der Leeseite des Gebirges wieder zu beginnen und entfaltet sich mit einer Breite bis zu 80 km bis zur Iller. Hagelband II hat seinen Anfang im Oberrheingraben bei Karlsruhe, überzieht den Kraichgau und zieht sich, dabei schwächer werdend, bis zum Taubertal. Das dritte Hagelband hat

seinen Schwerpunkt in der Region des Vogelberges, weist aber auch auf eine südwestliche Herkunft hin, die im Pfälzerwald zu suchen ist. Nordöstlich des Vogelberges erstreckt sich das Hagelband in abgeschwächter Form bis in den Kellerwald. Das Hagelband IV ist das breiteste und zugleich differenzierteste, wenngleich es weniger Hageljahre aufweist als die Hagelbänder I und II. Dieses bedeckt die nördliche Eifel-Region und durchzieht in einer breiten Bahn die Mittelrhenebene, die Münsterländer Bucht, die Senne und das Diemeltal bis hin zur Weser. Nördlich des Münsterlandes hält der Teutoburger Wald die weitere Ausbildung der Hagelregion auf und erst im Harzraum entwickelt sich das Hagelband wieder stärker bis es schließlich im Elbtal abreißt. Das fünfte Hagelband umfasst das Gebiet der Nordseeküste. Es besteht aus nur einigen isolierten Vorkommen größerer Hagelhäufigkeit wie dem Alten Land und Dithmarschen.

Es wird ersichtlich, dass aufgrund der Parallelität der Hagelbänder in SW-NE-Richtung die atmosphärischen Bedingungen den Ausschlag für die regionale Verteilung der Hagelhäufigkeit geben. Bei einer genaueren Betrachtung der geographischen Verteilung lassen sich jedoch auch inhomogene Muster erkennen, für die z. T. mikroklimatische Prozesse verantwortlich sind. Verschiedene Faktoren können zu einer höheren Hagelhäufigkeit führen (MÜNCHENER RÜCK, 1997; KLEINSCHROTH, 1999):

- **Effekte des Reliefs**

Hügeliges oder bergiges Gelände verursacht in Gebieten auf der Luv-Seite eine höhere Hagelfrequenz, während der Höhenrücken bzw. die Lee-Seite eine geringere Hagelhäufigkeit aufweisen. Von Bedeutung ist die Höhe über NN, die relative Höhe zur Umgebung, die Ausrichtung des Reliefs zur Hauptzugrichtung (Luv – Lee) und die Reliefenergie.

- **Effekte durch Gebiete mit einer hohen Luftfeuchtigkeit**

Flusstäler und Seeregionen bewirken häufig eine höhere Hagelhäufigkeit (z.B. Bodensee oder Donautal, MÜNCHENER RÜCK, 1997). SCHWIND (1957) bezeichnet dieselben dagegen als „hagelauflösende Gassen“, da sie häufig zusammenhängende Hagelbänder zerreißen und den Hagelniederschlag in vielen Fällen aufhalten.

- **Effekte städtischer Wärmekonzentration**

Ballungsräume können einen Wärmeeffekt aufweisen, der je nach Größe einige Grad Temperaturunterschied zum Umland ausmachen kann. Die

vermehrte Produktion von Wärme kann zu einer Verstärkung der Konvektion führen und damit die Hagelhäufigkeit erhöhen. Im Umkreis von München wurde z.B. eine um etwa 20 % höhere Hagelgefährdung festgestellt. Der städtische Einfluss kann noch in einer Entfernung von 10-30 km spürbar sein.

Das Relief wird von KLEINSCHROTH (1999) als der wichtigste Faktor beschrieben, während Gebiete mit hoher Luftfeuchtigkeit und städtische Wärmeinseln nur einen geringen Einfluss ausüben. Die mikroklimatischen Prozesse wirken sich bedeutend auf die Hagelbildung und –auflösung aus. Die mesoskaligen Verhältnisse sind jedoch der bestimmende Faktor bei der Entwicklung und Bewegung von Hagelgewittern.

3.1.5 Zugrichtung von Hagelgewittern

Die Ausrichtung der Bänder größter Hagelhäufigkeit von SCHWIND (1957) wird vor allem durch die atmosphärischen Bedingungen bestimmt. Die SW-NE-Richtung stimmt mit der Zugrichtung der vorherrschenden Windrichtung aus SW bis WSW überein. Daraus lässt sich schließen, dass großräumige, sich über viele Kilometer erstreckende Hagelgewitter diesen Bahnen folgen, da sie an Luftmassenfronten entstehen und sich zusammen mit der Front bewegen, während kleinere Hagelgewitter, meist lokal entstandene Wärmegewitter, örtlich begrenzt sind. Das Fortschreiten des Hagelgewitters wird nur geringfügig von der Geomorphologie beeinflusst. SCHWIND (1957) stellte fest, dass sich Hagelgewitter in den Alpen in einer bestimmten Richtung – dabei meist der Luftdruckverteilung der mittleren und hohen Troposphäre folgend – bewegen, ohne Rücksicht darauf, ob Gebirgszüge und Talrichtungen mit ihnen übereinstimmen oder nicht. Hagelzüge, die am gleichen Tage auftraten, verfolgten fast immer die gleiche Richtung oder sind parallel und geradlinig angeordnet. Unterbrochene Hagelzüge setzen sich in gleicher Richtung fort, auch wenn Gebirgsketten von 2.000 m Kammhöhe und darüber überschritten werden.

KLEINSCHROTH (1999) hat in ihrer Studie die Zugrichtungen von Hagelzügen in Bayern untersucht und konnte auf 18.000 Hagelschadenmeldungen aus den Jahren 1979-1989 und 1993-1996 zurückgreifen. Dabei wurden die Schadenmuster der am

selben Tag betroffenen Gemeinden und die Windrichtung in etwa 500 hPa, die nach BROWNING u. FOOTE (1976) für die Bewegung von Hagelgewittern entscheidend ist, mit der zugehörigen Höhenwetterkarte des Deutschen Wetterdienstes kombiniert und so die Zugrichtungen ermittelt. Daraus ergibt sich, dass in 88 % aller Gemeinden in Bayern die Hagelzüge aus Westen und Westsüdwesten kommen (Abb. 12). Lediglich in 6 % der Gemeinden treten Hagelzüge in Westnordwest-Richtung auf; in 5 % der Gemeinden in Südwest-Richtung.

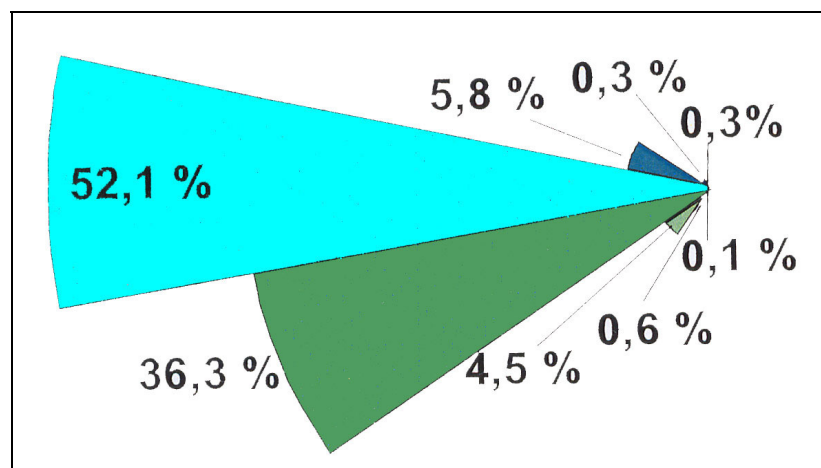


Abbildung 12: Mittlere Zugrichtungen von Hagelgewittern in Bayern
(Quelle: KLEINSCHROTH, 1999)

Die Verteilung der mittleren Hagelzugrichtung von KLEINSCHROTH (1999) zeigt eine nur mäßige Übereinstimmung mit den Hagelbändern, die SCHWIND (1957) in seiner Arbeit präsentiert: Diese verlaufen überwiegend in SW-NE Richtung. Für das Hagelschadenmodell werden aber aufgrund der besseren Datengrundlage die mittleren Zugrichtungen von Hagelereignissen in Bayern verwendet und auf ganz Deutschland übertragen.

3.1.6 Zeitliche Variabilität

Die zeitliche Variabilität gehört neben den räumlichen und intensitätsmäßigen Schwankungen zu den wichtigsten Charakteristika von Hagelstürmen. Anhand der jährlichen, monatlichen (saisonalen) und täglichen Periode sollen die Unterschiede in den folgenden Unterkapiteln aufgezeigt werden.

3.1.6.1 Jährliche Hagelvariabilität

Die Anzahl von Hageltagen in Deutschland pro Kalenderjahr für den Zeitraum 1934-1984 wird in Abbildung 13 gezeigt. Mit einem Maximum von 93 Hageltagen 1936 und einem Minimum von 36 Hageltagen 1984 liegt eine große Spannweite vor. Nach der Bayerischen Landeshagelversicherungsanstalt lag der Durchschnitt von 1884-1933 bei 64 Hageltagen. Dieser hat sich in den darauf folgenden 60 Jahren nur geringfügig auf 67 Hageltage erhöht. Da diese Darstellung der jährlichen Hagelperiode auf Daten eines regionalen Versicherers beruht, der nicht in allen Teilen des Landes vertreten ist, dürfte die tatsächliche Anzahl der Hageltage höher liegen. Nach LINDLOFF (2003) rechnet man in Deutschland jährlich mit 80-100 Hageltagen. Dies entspricht eher einer für Deutschland realitätsnahen Größenordnung.

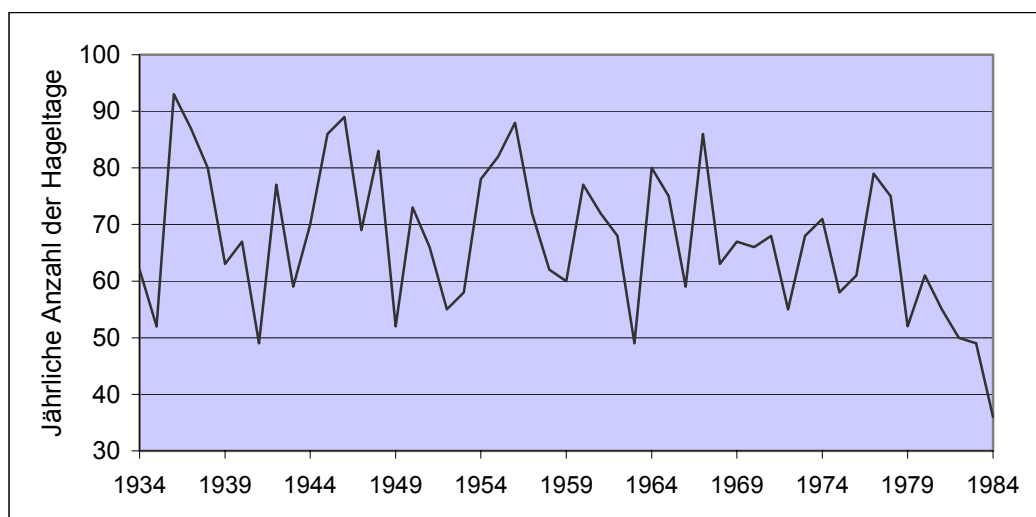


Abbildung 13: Jährliche Anzahl der Hageltage in Deutschland von 1934-1984 (verändert nach: MÜNCHENER RÜCK, 1984)

Die Trendsignifikanz nach dem verteilungsunabhängigen MANN-KENDALL-Test liegt bei 99 % und deutet somit auf einen negativen Trend der Hageltage in Deutschland hin. Allein diese Daten können jedoch kein Beleg dafür sein, dass in Zukunft mit weniger Hagelstürmen zu rechnen ist. Die durchschnittliche Standardabweichung beträgt 12,5 Tage.

GIAIOTTI et al. (2003) haben die jährliche Hagelhäufigkeit verschiedener Länder in Europa miteinander verglichen. Und auch wenn die Daten mit verschiedenen

Messmethoden gewonnen wurden und somit ein direkter Vergleich schwierig ist, so kann man in Abbildung 14 gut erkennen, dass hier ebenfalls große Unterschiede in der jährlichen Verteilung vorliegen.

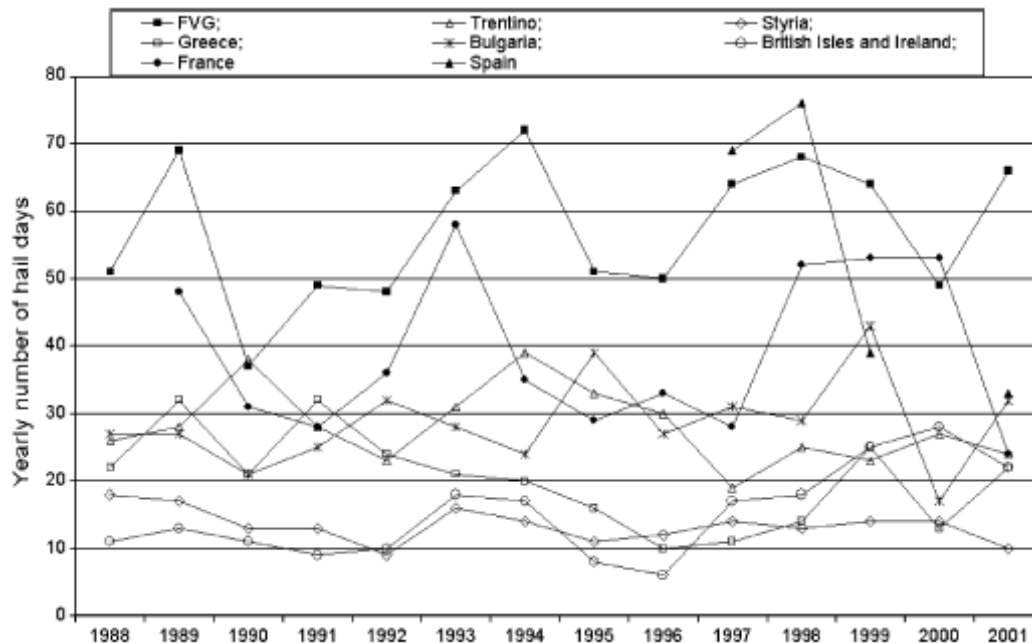


Abbildung 14: Zeitreihen der jährlichen Anzahl der Hageltage in verschiedenen Gebieten und Ländern Europas: Friuli Venezia Giulia in Italien, Trentino in Italien, Styria in Österreich, Griechenland, Bulgarien, Britische Inseln und Irland, Frankreich und Spanien (Quelle: GIAIOTTI et al., 2003)

In Großbritannien wurde in den Jahren 1980 bis 1999 eine durchschnittliche jährliche Anzahl von 14 Hageltagen festgestellt, die zwischen 6 und 25 Tagen pro Jahr schwankt (WEBB et al., 2001) und damit ebenfalls großen Unterschieden unterworfen ist.

Zusammenfassend kann man sagen, dass in jedem der vorherig genannten Gebiete und Länder Europas eine hohe jährliche Variabilität von Hagelereignissen vorliegt, für deren Erklärung im Einzelnen die klimatischen und geographischen Bedingungen näher untersucht werden müssten. Allgemein kann festgehalten werden, dass Fluktuationen in allen Ländern in mehr oder weniger starker Ausprägung vorkommen und zu den natürlichen Eigenschaften von Hagelereignissen gehören.

3.1.6.2 Saisonale Hagelvariabilität

Die saisonale Hagelhäufigkeit, dargestellt in Abbildung 15, basiert auf durchschnittlichen Monatswerten und zeigt ebenso wie die jährliche Hagelhäufigkeit eine starke Variabilität. Allein im Zeitraum Mai bis August fallen ca. 85 % der Hagelereignisse; mit einer Spitze von ca. 33 % im Juli.

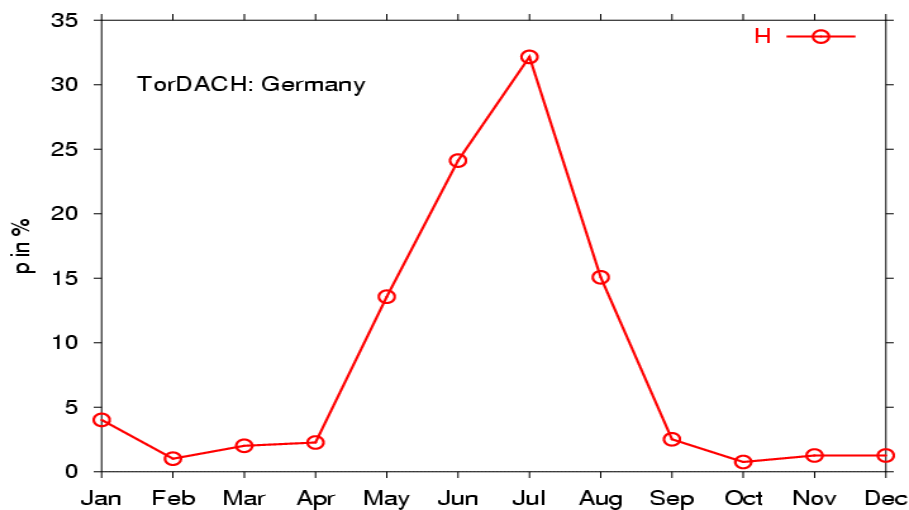


Abbildung 15: Prozentuale Verteilung der durchschnittlichen monatlichen Hagelhäufigkeit in Deutschland basierend auf 413 Hagelmeldungen mit Hagel > 20 mm oder Hagel beliebiger Größe, der zusammen mit Windschäden aufgetreten ist (Quelle: www.tordach.org)

Hagel fällt also hauptsächlich in den Sommermonaten, in denen hohe Temperaturen eine rasche Erwärmung der Luft in Bodennähe bewirken und durch den Aufstieg feuchtwarmer Luftpakete es zu einer schnellen Bildung von hagelproduzierenden Gewittersystemen kommt. Im Winter dagegen verhindern niedrige Temperaturen die Bildung von hohen Cumuluswolken mit starken Aufwinden, die für die Bildung von großen Hagelkörnern benötigt werden. Der große Unterschied zwischen den Sommermonaten und den übrigen Monaten fällt nicht so stark ins Gewicht, wenn man alle Hagelkorngrößen miteinbezieht (Abbildung 15 repräsentiert nur Hagel > 20 mm und Hagel, der zusammen mit Windschäden aufgetreten ist). McMASTER (2001) hat 739 Hagelstürme in der Zeit von 1795 bis 1998 in Australien untersucht und die Häufigkeiten aller Hagelereignisse mit denen von extremen Hagelereignissen verglichen. Dabei wird deutlich, dass in den Wintermonaten April bis August bedeutend weniger extreme Hagelereignisse in Relation zu der Anzahl der Hagelereignisse aller Größenklassen auftreten. In den Sommermonaten Dezember bis März ereignen sich hingegen häufiger extreme Hagelereignisse (Abb. 16). Der

winterliche Hagel ist also meist kleinkörnig. Dies rührt daher, dass der im Winter gebildete Hagel wegen der niedrigen Temperatur und der geringen Höhe der Gewitterwolken nicht schmilzt, bevor er den Boden erreicht. Demgegenüber steht der kleinkörnige Hagel in den Sommermonaten, der aufgrund der höheren Temperaturen meist wieder schmilzt, bevor er auf den Boden fällt. Trotzdem ist es nicht ausgeschlossen, dass auch im Winter bei warmen Südwest und feuchter, milder Luft schwerer Hagel auftreten kann (SÜRING, 1939). Die Frage, ob ein Hagelkorn am Boden ankommt oder nicht, ist also nicht nur davon abhängig, welche Wachstumsbedingungen innerhalb der Gewitterwolke vorherrschen, sondern hängt bei kleineren Hagelkörnern maßgeblich auch von der Schmelzrate unterhalb der Gewitterwolke ab (FRAILE et al. 2003).

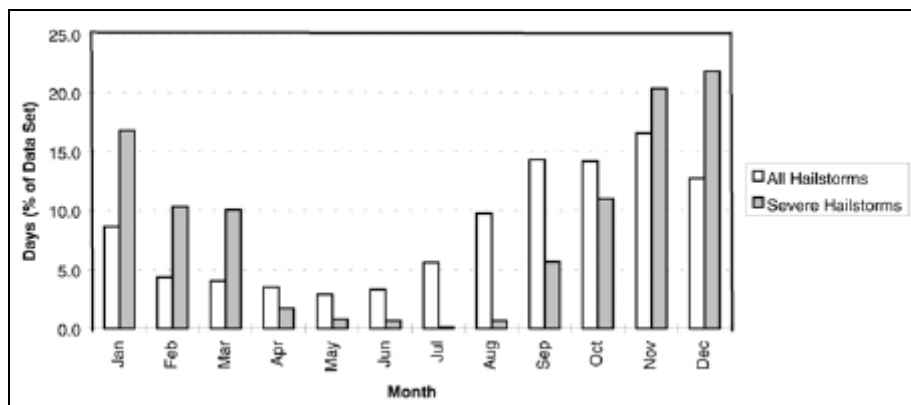


Abbildung 16: Monatliche Verteilung der Hageltage in New South Wales, Australien (Quelle: McMASTER, 2001)

Untersuchungen in anderen Ländern Europas kommen zu einer ähnlichen monatlichen Verteilung der Hageltage, wie sie in Abbildung 15 für Deutschland zu sehen ist. In Großbritannien treten in 77 % aller Fälle schwere Hagelstürme der Klasse H3 (vgl. Anhang B) zwischen Mai und August auf; 52 % im Juni und Juli. GIAIOTTI et al. (2003) haben auf der Grundlage von 3.408 Hagelmattendaten die durchschnittliche monatliche Verteilung von Hagelkörnern in Norditalien untersucht und dabei herausgefunden, dass zwischen April und September die größte Anzahl an Hagelkörnern entstehen; mit Spitzenwerten im Juni und Juli. Bei einer Analyse der 50 stärksten Hagelstürme der Klasse H5-6 oder höher in den vergangenen 350 Jahren entdeckten WEBB et al. (2001), dass all jene Hagelstürme in den Monaten Mai bis September zu Tage traten. Extreme Hagelereignisse mit großen Hagelkörnern werden also überwiegend in den Sommermonaten registriert. Es liegt daher nahe,

auch anzunehmen, dass in diesen Monaten der größte Schaden an Kraftfahrzeugen entsteht. HOHL et al. (2002) unterscheiden in ihrer Studie zwischen einer „high season“ (15. Juni – 15. August), in der ein höherer Prozentsatz großer Hagelkörner produziert wird, und einer „low season“ (Zeit davor und danach). Bei einem Vergleich der Schäden verursacht durch Gewitterstürme in der „high season“ und „low season“ stellte sich heraus, dass die Schäden an Kraftfahrzeugen, die mehr als 50 % der Versicherungssumme eines Objektes ausmachten, in der „high season“ weitaus häufiger vorkamen als in der „low season“.

3.1.6.3 Täglicher Gang der Hagelhäufigkeit

Die tägliche Periode der Hagelhäufigkeit in Deutschland, unterteilt in stündlichen Abständen, wird in Abbildung 17 dargestellt. Die größte Hagelhäufigkeit tritt in den nachmittäglichen Stunden ein, mit einem Maximum um 18 Uhr und einem sekundären Maximum in der Nacht. In der Zeit von 14-19 Uhr treten ca. 70 % aller Hagelereignisse auf. SÜRING (1939) führt tägliche Hagelperioden in Sachsen, Bayern und Süddeutschland auf: In Sachsen fallen nur 9 % der Hagelfälle auf den Vormittag (0-12 Uhr) und 91 % auf den Nachmittag (72 % zwischen 14-18 Uhr). In Bayern und Süddeutschland weichen die Zahlen nur geringfügig von denen in Sachsen ab. Der Hagelfall ist demnach fast ausschließlich auf die heißesten Tagesstunden und die ihnen zunächst folgenden Stunden beschränkt, ebenso wie er fast ausschließlich den Sommermonaten zugeordnet werden kann. Der Hagelfall erweist sich dadurch als im höchsten Grade abhängig von einer raschen Temperaturabnahme mit der Höhe, einer Überwärmung der unteren Luftschichten und zugleich einem hohen Wasserdampfgehalt der Luft.

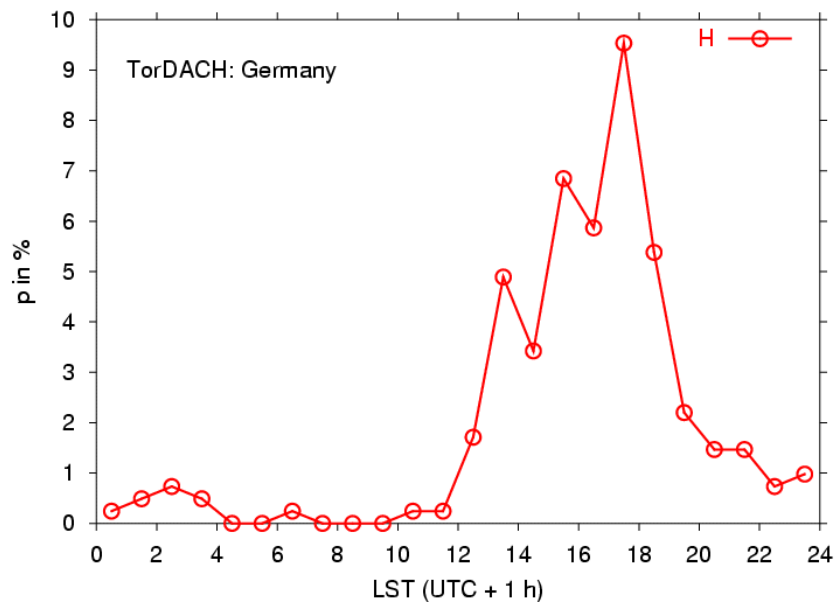


Abbildung 17: Tägliche Periode der Hagelhäufigkeit in Deutschland (Quelle: www.tordach.org)

Eine mögliche Erklärung für das sekundäre Maximum um 2 Uhr sehen GIAIOTTI et al. (2003) darin, dass der Wasserdampfgehalt im vertikalen Profil der Atmosphäre während dieser Uhrzeit größer ist als in den Stunden davor und danach. Ein höherer Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre bewirkt, dass mehr unterkühlte Wassertröpfchen entstehen, die zu Eiskristallen gefrieren oder an bereits gebildeten Eiskristallen anfrieren. Andererseits haften Daten von Hagelhäufigkeiten während der Nacht immer Zweifel an, da Hagelberichte nicht so gewissenhaft und beständig wiedergegeben werden wie solche während des Tages. So berichtet Gokhale (1975) von Hageluntersuchungen im Kaukasus, Polen und der damaligen UDSSR, dass Hagel in der Zeit von 13-19 Uhr fällt, im Zeitraum von 2-6 Uhr aber kein Hagelfall registriert wurde.

3.1.6.4 Dauer eines Hagelfalls

Die zeitliche Ausdehnung eines Hagelfalls ist definiert als die Periode, während der an einem Punkt auf der Erdoberfläche mehr oder weniger kontinuierlich Hagel fällt. Dabei kann die Dauer eines Hagelfalls von nur wenigen Sekunden bei einem lokalen Wärmegewitter bis zu einer Stunde bei einem sehr großen Superzellengewitter reichen. Während des Münchener Hagels von 1984, der sich durch eine sehr stark entwickelte Superzelle auszeichnete, dauerten die Hagelfälle durchschnittlich 20

Minuten (KURZ, 1986); Die extremsten Hagelfälle dürften also noch weitaus länger angedauert haben.

GOKHALE (1975) vergleicht in seiner Studie die Hagelfalldauer in verschiedenen Ländern: Die durchschnittliche Dauer eines Hagelfalls variiert in den meisten Fällen zwischen 5 und 10 Minuten. Das Maximum lag bei 90 Minuten und wurde in Frankreich gemessen. Bei der Gegenüberstellung der Hagelfalldauer verschiedener Regionen in Frankreich stellte DESSENS (1986) fest, dass auch hier signifikante Unterschiede bestehen. Während die durchschnittliche Dauer eines Hagelfalls in mediterranen Gebieten Frankreichs 14,7 Minuten andauert, liegt sie im zentralen Frankreich lediglich bei 11,6 Minuten.

3.1.6.5 Die Bedeutung der zeitlichen Variabilität bei der Modellierung

Die zeitliche und räumliche Variabilität von Hagelgewittern ist bei der Darstellung der Naturgefahrenmodellkomponente Werteverteilung ein wichtiges Kriterium. Das Werteverteilungs-Modul berechnet die Anzahl der Kraftfahrzeuge, die von einem Hagelgewitter beschädigt werden. Dies hängt von der Anzahl der Kraftfahrzeuge in dem betroffenen Gebiet ab und ob sie geschützt in einer Garage oder ungeschützt auf der Straße stehen. So beträgt nach LEIGH u. KUHNEL (2001) der Anteil der Kraftfahrzeuge in Sydney, die auf der Straße parken, über 70 %, während hingegen in den Vororten nur noch 3 % auf der Straße geparkt stehen. Um diesen Schutz-Faktor zu berücksichtigen, muss die registrierte Anzahl der Kraftfahrzeuge, die von einem Hagelfall getroffen werden kann, mit einem Faktor versehen werden, der den Anteil der geschützt stehenden Kraftfahrzeuge unter Beachtung der räumlichen Variabilität repräsentiert. Die meisten Kraftfahrzeuge stehen nur in einer gewissen Zeitspanne in der Garage, in der übrigen Zeit befinden sie sich auf öffentlichen Parkplätzen oder auf der Straße. Diese Faktoren variieren mit der Tageszeit, dem Wochentag und der Jahreszeit. Wie wir in den vorangegangenen Kapiteln gesehen haben, ist die Variabilität dieser zeitlichen Faktoren sehr hoch, so dass eine differenzierte Betrachtung und Implementierung in das Hagelschadenmodell nötig sind. Die Winterthur Versicherung, ein großer Kaskoversicherer in der Schweiz, hat eine Studie in Auftrag gegeben, welche die räumliche Verteilung in städtischen und vorstädtischen Gebieten in der Schweiz durch Verkehrszählungen näher beleuchten sollte. Während der Nachmittagsstunden von 15-16 Uhr UTC befanden sich 15 %

der Kraftfahrzeuge im Verkehr und 85 % waren geparkt (davon 40 % im Freien). In den frühen Abendstunden während des Feierabendverkehrs stieg der Anteil der Fahrzeuge im Verkehr auf bis zu 65 % an (HOHL et al., 2001). In dieser Zeit von 16-19 Uhr UTC hat die tägliche Hagelhäufigkeit ihr Maximum (vgl. Abb. 17), so dass bei einem Hagelfall mit vielen beschädigten Kraftfahrzeugen zu rechnen ist. In den frühen Morgenstunden ist die Gefährdung aufgrund des Arbeitsverkehrs ebenfalls hoch, die potenzielle Hagelgefahr jedoch gering, da morgens die Konvektion bodennaher Luftschichten noch gering ist.

Bei der Betrachtung der räumlichen Verteilung der Kraftfahrzeuge innerhalb der Woche, sollte ebenfalls eine Unterscheidung nach Wochentagen (Montag – Freitag) und Wochenende vorgenommen werden. Während von Montag bis Freitag ein Hagelfall in den Abendstunden wie oben beschrieben einen beträchtlichen Schaden hervorriefe, beliefe er sich am Samstag oder Sonntag aufgrund des geringen Verkehrsstromes nur auf einen kleinen Teil von diesem.

Der Zusammenhang zwischen der zeitlichen Variabilität von Hagelfällen und der räumlichen Verteilung der Kraftfahrzeuge ist demnach für die Modellierung von Schäden äußerst wichtig, konnte in dieser Version des Hagelschadenmodells aber noch nicht integriert werden.

3.1.7 Generierung eines Hagelereigniskatalogs

Ein zuverlässiger und vollständiger Ereigniskatalog ist das Fundament eines jeden probabilistischen Naturkatastrophenmodells. Die Erstellung eines synthetischen Ereigniskatalogs beruht auf der Analyse historischer Ereignisse, von denen Gesetzmäßigkeiten abgeleitet werden, um auf deren Grundlage alle möglichen Variationen repräsentativer Hagelereignisse darzustellen.

Der stochastische Ereigniskatalog des Hagelschadenmodells ist charakterisiert durch die folgenden Parameter:

- Geographische Lage des Hagelereignisses
- Länge des Hagelereignisses
- Breite des Hagelereignisses
- Ausdehnung des Hagelereignisses
- Zugrichtung des Hagelereignisses
- Kern- und Randzone des Hagelereignisses

Die Werte der Parameter variieren gemäß statistischer Verteilungen, die von Datensätzen und anderen klimatologischen Informationen abgeleitet werden. Tausende von Werten werden zufällig aus diesen Verteilungen entnommen (Monte Carlo Simulation). In Abbildung 18 ist schematisch der Prozess der Generierung des Hagelereigniskatalogs dargestellt.

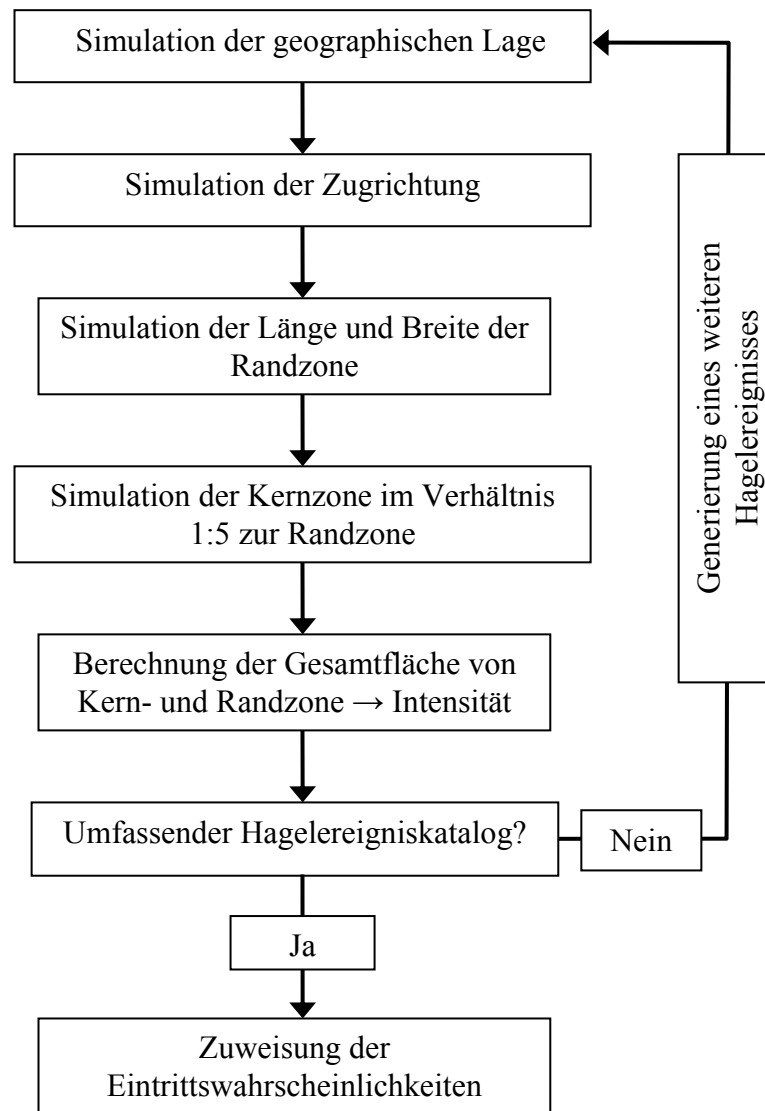


Abbildung 18: Prozess der Hagelereignisgenerierung

Der erste Schritt bei der Generierung eines Hagelereignisses ist die Bestimmung der geographischen Lage. Dazu werden in einem Deutschland umschließenden, fiktiven Rechteck die Hagelereignisse simuliert. Dabei kann es passieren, dass Hagelereignisse vollständig oder auch nur zum Teil außerhalb Deutschlands erzeugt werden. Denkbar wäre es auch, Hagelereignisse nur innerhalb Deutschlands zu simulieren. Dabei würde man aber insbesondere diejenigen Hagelstürme vernachlässigen, die außerhalb Deutschlands entstehen und dann nach Deutschland ziehen. Daher wird der Anfangspunkt eines Hagelereignisses zufällig innerhalb des fiktiven Rechtecks simuliert. Im nächsten Schritt wird die Zugrichtung ermittelt. Zu diesem Zweck wurde auf Grundlage der mittleren Zugrichtungen in Bayern

(vgl. Abb. 12) eine Verteilungsfunktion erstellt, die die Werte für die Zugrichtung im Hagelschadenmodell liefert. Darauf folgend können die Länge und Breite der Randzone, die die äußere Abgrenzung eines Hagelsturms darstellen, simuliert werden. Die Verteilungsfunktionen dieser beiden Parameter, welche aus den mittleren Hagelsturmlängen und -breiten in Bayern (vgl. Anhang C) erstellt wurden, sind durch einen Korrelationskoeffizienten miteinander verbunden, während die übrigen Parameter unabhängig voneinander erstellt werden. Die Längen der Hagelereignisse reichen von 10-360 km, die Breiten von 2-26 km. Danach folgt die Simulation der Kernzone. Diese nimmt in ihrer Breite eine Größe von 1:5 im Verhältnis zur Breite der Randzone ein und stellt den zentralen Bereich eines Hagelsturmes dar, der aufgrund seiner größeren Intensität sowohl einen höheren Schaden als auch einen höheren Betroffenheitsgrad bei den Kraftfahrzeugen hervorruft. Die äußere Form, die die Kern- und Randzone annehmen, ist gleich und im vergrößerten Bildausschnitt in Abbildung 19 zu sehen. In ähnlicher Weise arbeitet das Hagelmodell HailAUS mit drei konzentrischen Ellipsen unterschiedlicher Intensität, die ein Flächenverhältnis von 5:2:1 haben (RISK FRONTIER, 2003). Beide Formen unterscheiden sich voneinander nur geringfügig. Sie stellen beide, vergleicht man die Hagelstürme in den Abbildungen 8, 9 und 10 miteinander, eine realitätsnahe Annäherung an die wirkliche äußere Gestalt eines Hagelsturmes dar. Im nachfolgenden Schritt wird die Gesamtfläche des Hagelereignisses berechnet, mit der in dem Modul der Schadenberechnung später die Intensität bestimmt wird. Hiermit ist der Vorgang der Simulation eines Hagelereignisses abgeschlossen. Er wiederholt sich so oft, bis eine gewünschte Anzahl an Hagelereignissen erstellt wurde.

In Abbildung 19 wird beispielhaft das Ergebnis von 100 simulierten Hagelereignissen gezeigt. Bei der Annahme, dass in Deutschland im Durchschnitt 100 Hagelstürme pro Jahr auftreten (s. Kap. 3.1.6.1), spiegelt diese Karte ein simuliertes Jahr wider. Dabei kommt es in diesem Beispiel zu einer Häufung von Hagelereignissen im Nordwesten und Südosten, während die Mitte Deutschlands weitestgehend von großen Hagelunwettern verschont bleibt. Bei der Simulation einer geringen Anzahl von Ereignissen, so wie in diesem Fall, ist eine zufällige Verteilung der Hagelereignisse unvermeidbar. Vielmehr geben sie die natürlichen Schwankungen der geographischen Variabilität von Hagelstürmen wieder.

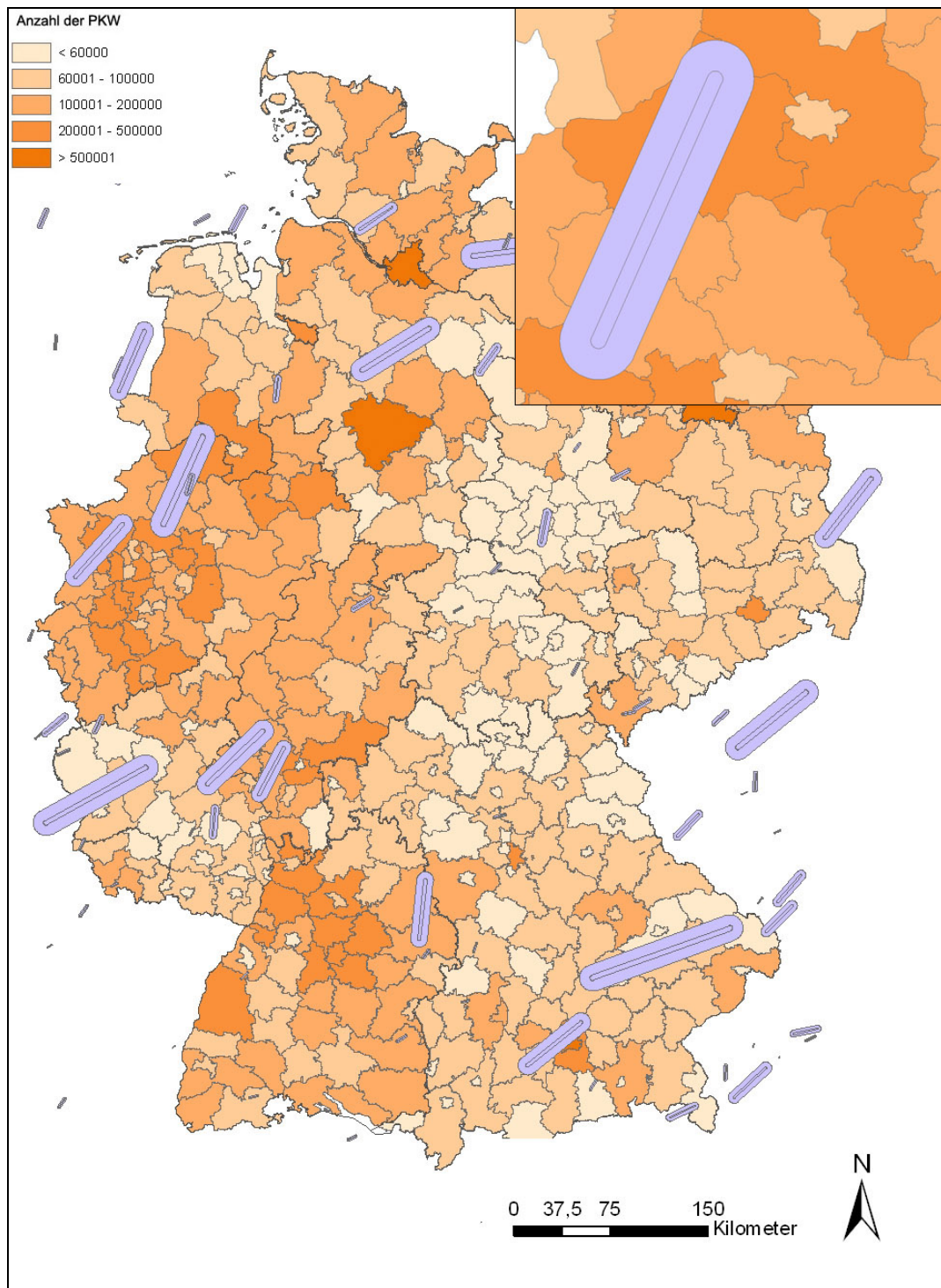


Abbildung 19: Darstellung von einhundert simulierten Hagelereignissen in Deutschland unterlegt mit dem totalen PKW-Bestand (vgl. Abb. 2). Der vergrößerte Bildausschnitt oben rechts zeigt den Aufbau eines simulierten Hagelereignisses mit Kern- und Randzone

Ein umfassender Hagelereigniskatalog sollte aber möglichst alle denkbaren Hagelstürme abbilden, wie sie in Deutschland tatsächlich auftreten könnten. Der Hagelereigniskatalog, mit dem alle weiteren Berechnungen durchgeführt werden, enthält 8.250 simulierte Hagelereignisse. Jedem dieser 8.250 Hagelereignisse wird

im folgenden Schritt eine Eintrittswahrscheinlichkeit zugewiesen. Dazu werden die Karten der Häufigkeitsverteilung der Hageltage in Deutschland und der 8.250 Hagelereignisse in ArcMap miteinander verschnitten. Am Ende dieses Prozesses steht ein kompletter Katalog aller möglichen Ereignisse mit der geographischen Lage und Ausdehnung sowie der Eintrittswahrscheinlichkeit zur Verfügung.

3.2 Die Werteverteilung

Das Modul der Werteverteilung enthält Informationen über die Kraftfahrzeuge, deren Eigenschaften und geographische Verteilung. Die zentralen Angaben im Hagelschadenmodell bestehen aus der Anzahl der Kraftfahrzeuge und ihrer geographischen Lage. Die im Folgenden verwendeten Daten stellen zum einen den totalen (s. Abb. 2) zum anderen den versicherten Personenkraftwagenbestand in Deutschland dar. Der Personenkraftwagenbestand beträgt in Deutschland ca. 83 % des totalen Kraftfahrzeugbestands. Die übrigen 17 % fallen in die Klasse der Lastkraftwagen, Krafträder, Omnibusse, Kraftfahrzeuganhänger, Zugmaschinen oder Sonstige. Diese weisen hinsichtlich der Schadenempfindlichkeit gegenüber Hagel z. T. erhebliche Unterschiede auf und werden deswegen in den Analysen nicht berücksichtigt. Insgesamt umfasst der totale (versicherte) Personenkraftwagenbestand in Deutschland 44,7 Mio. (38,3 Mio.) Fahrzeuge.

Die korrekte und sorgfältige Eingabe dieser Daten wirkt sich stark auf die Qualität der Ergebnisse aus, da eine ungenaue Zuordnung der Kraftfahrzeuge einen steigenden Grad an Unsicherheit nach sich zieht. Je genauer die Kraftfahrzeuge lokalisiert werden können, desto genauer kann eine Analyse durchgeführt werden. Dies bedeutet, dass Angaben auf Postleitzahlebene weitaus bessere Modellierungen zulassen als Daten, die nur auf Landkreisebene zur Verfügung stehen. Die Umverteilung von Kraftfahrzeugen nur auf bebaute Gebiete nach der CLC-Klassifikation (vgl. Kap. 2.4) stellt daher eine gute Methode dar, diese exakter lokalisieren zu können. Insbesondere für die in den Testdurchläufen verwendeten Daten, die nur auf Landkreisebene vorliegen, ist diese Umverteilung ein wichtiger Schritt, um bessere Resultate zu erzielen.

Zunächst befinden sich die Personenkraftwagen dort, wo sie registriert sind. Es wird vereinfachend also eine Nicht-Mobilität der Kraftfahrzeuge angenommen. Die

beiden Personenkraftwagenbestände werden dann auf Gebiete verteilt, in denen sie sich mit einer hohen Wahrscheinlichkeit auch wirklich befinden. Dadurch kommt es zu einer starken Verdichtung der Kraftfahrzeuge. Am Beispiel des Landkreises Dithmarschen in Schleswig-Holstein werden 76.000 registrierte Personenkraftwagen umverteilt. Flächen mit einer hohen Bebauungsdichte stellen ca. 15 % der gesamten Fläche des Landkreises Dithmarschen dar, so dass ein starker Zuwachs an Genauigkeit durch die Umverteilung erreicht wird. Die Anzahl der Kraftfahrzeuge, die jedem bebauten Gebiet zugewiesen wird, richtet sich nach dem Anteil an der Gesamtfläche aller bebauten Gebiete im jeweiligen Landkreis.

In einem nächsten Schritt wird ermittelt, wie viele Kraftfahrzeuge von jedem simulierten Hagelsturm erfasst werden. Dazu wird der gesamte Hagelereigniskatalog des Naturgefahrenmoduls virtuell über den Personenkraftwagenbestand in Deutschland gelegt. Dabei wird die Anzahl der Personenkraftwagen sowohl für die Kern- als auch für die Randzone aufgenommen. Für Landkreise, die nicht im vollen Umfang innerhalb eines Hagelsturms liegen, wird anteilig an der Gesamtfläche die Anzahl der Personenkraftwagen ermittelt.

Von diesen Fahrzeugen wird jedoch nur ein kleiner Teil wirklich von Hagel getroffen. Dies ist von verschiedenen Faktoren abhängig, wie (1) der räumlichen und zeitlichen Variabilität des Portfolios, das mit der Tageszeit, dem Wochentag und der Saison variiert (vgl. Kap. 3.1.6), (2) der konstanten Bewegung der Kraftfahrzeuge (insbesondere von Pendlern im Arbeitsverkehr und Personentransportfahrzeugen), (3) dem Anteil der Kraftfahrzeuge, die geschützt geparkt sind und (4) der Fläche des Hagelsturms, auf der es zum Hagelfall kommt. Diese Faktoren werden im Betroffenheitsgrad berücksichtigt, der den Anteil der Kraftfahrzeuge, die beschädigt werden, an den von einem Hagelsturm erfassten Kraftfahrzeugen darstellt. Der Betroffenheitsgrad wird für die Kern- und Randzone als eine lineare Funktion der Hagelsturmgröße dargestellt. Der minimale Betroffenheitsgrad wird für die Randzone auf 5 % bzw. 10 % für die Kernzone festgelegt, während maximal 25 % der Kraftfahrzeuge in der Randzone bzw. 30 % in der Kernzone beschädigt werden können. Am Ende dieses Prozesses liegt eine Liste vor, die für jeden simulierten Hagelsturm die Anzahl der betroffenen Personenkraftwagen der Kern- und Randzone enthält.

3.3 Die Schadenempfindlichkeit

Dieser Teil des Naturgefahrenmodells beschreibt die Schadenempfindlichkeit der Kraftfahrzeuge gegenüber einer bestimmten Intensität eines Hagelsturms. Da Kraftfahrzeuge aus unterschiedlichen Materialien in unterschiedlicher Weise gefertigt werden, kann ihr Verhalten gegenüber dem Einschlag von Hagelkörnern stark voneinander abweichen. Beim Auftreffen des Hagelkorns auf die Karosserie wird die kinetische Energie in Hitze, Lärm und einer Deformierung der betroffenen Stelle umgewandelt. In den meisten Fällen führt dies zu Dellen in der Karosserie oder zum Zerspringen der Windschutzscheiben. Die Reparaturkosten können mitunter sehr stark schwanken. Seit ca. sieben Jahren werden in Deutschland die Dellen mit Spezialwerkzeugen entweder von innen herausgedrückt oder von außen herausgezogen, wobei weder Lack noch Blech beschädigt werden, während früher die Dellen mit Spachtelmasse gefüllt und dann überlackiert wurden. Dadurch liegen die Reparaturkosten um etwa 40 % niedriger (HAGEDORN, 2006). Der Preis für eine Hagelschaden-Reparatur liegt mit der „sanften“ Methode pro Beule bei rund sieben Euro, was jedoch von der Größe der Hagelkörner und der Qualität der Karosserie abhängig ist. Zu diesem Zweck werden Schadenempfindlichkeitskurven entworfen, die die Beziehung zwischen einer bestimmten Intensität eines Hagelsturms und dem mittleren Schaden zum Ausdruck bringen und die unterschiedlichen Eigenschaften der Kraftfahrzeuge widerspiegeln sollen. Der Festlegung angemessener Schadengradkurven kommt eine besondere Bedeutung zu, da sie einen wesentlichen Einfluss auf die Höhe der modellierten Schäden haben. Daher ist ein umfassendes Verständnis sowohl des physikalischen Verhaltens der Materialien beim Auftreffen eines Hagelkorns auf der Karosserie als auch die daraus resultierenden Reparaturkosten überaus wichtig.

Um nicht für jedes Kraftfahrzeug eine eigene Schadenempfindlichkeitskurve zu erstellen, sollte eine Kategorisierung der Kraftfahrzeuge nach unterschiedlichen Eigenschaften vorgenommen werden. Schadendaten von Versicherungen können dazu verwendet werden, Unterscheidungen nach dem Fahrzeugtyp oder dem Baujahr zu treffen. Dafür eignen sich am besten isolierte Schadendaten, also Daten, die einem bestimmten Hagelsturm, dessen Intensität bekannt ist, zugeordnet werden können und aufgeschlüsselt sind nach den o. g. Unterscheidungskriterien. Während für die

Naturgefahren Sturm oder Überschwemmung detailreiche Schadenkurven existieren, fehlen diese für Hagel noch weitgehend. Auch liegen nicht genügend eigene isolierte Schadendaten vor, um fundierte Schadenempfindlichkeitskurven erstellen zu können. Daher wird vereinfachend angenommen, dass alle Personenkraftfahrzeuge die gleichen Eigenschaften gegenüber Hagel aufweisen und mit einer einzigen Schadenempfindlichkeitskurve alle Kraftfahrzeugtypen abgebildet werden können.

Es wurde festgestellt, dass die Hagelsturmgröße, die in dem Hagelschadenmodell die Intensität repräsentiert, mit der Höhe des Schadens korreliert, wenngleich nicht genau bekannt ist, wie stark die Korrelation ist (vgl. Kap. 3.1.3). Neben dem Münchener Hagelsturm werden bei der Kurvenanpassung noch weitere große Hagelereignisse der letzten Jahre aus der Schweiz und Deutschland, von denen sowohl der Durchschnittsschaden als auch die Sturmgröße bekannt sind, verwendet. Die aus diesen Daten erstellte Schadenempfindlichkeitskurve wird in Abbildung 19 gezeigt. In dieser stellt der Münchener Hagel das schwerste aller Ereignisse mit einem Durchschnittsschaden von 3.500 EUR dar. Im unteren Bereich der Kurve wächst der Durchschnittsschaden mit zunehmender Hagelsturmgröße zunächst nur langsam an. Bei kleineren Hagelereignissen dieser Größenordnung handelt es sich meist um lokale Wärmegewitter, die nur kleine Hagelkörner produzieren und somit nur einen geringen oder gar keinen Schaden an Kraftfahrzeugen nach sich ziehen. Dieser Teil ist nur schwer zu modellieren, da zwar Durchschnittsschäden ermittelt werden können, aber ihr Auftreten lokal begrenzt ist, so dass sie von den dauerhaft bestehenden Messnetzen nur selten erfasst werden. Der folgende Teil der Kurve ist geprägt durch einen exponentiellen Anstieg. Es kann davon ausgegangen werden, dass Hagelstürme in diesem Bereich aus Multizellen- oder Superzellengewittern entstehen, da lokale Wärmegewitter größtenteils nur eine geringe Ausdehnung haben. In Multizellen- und Superzellengewittern nehmen die Aufwinde im Sturmsystem und damit die Hagelkorngröße mit wachsender Sturmgröße stark zu, so dass der Schaden überproportional ansteigt. Im weiteren Kurvenverlauf steigt der Durchschnittsschaden nur noch langsam an und die Kurve erreicht bald ihre Sättigung. Dies ist damit zu begründen, dass bei Kraftfahrzeugen, die bereits stark beschädigt wurden, ab einem gewissen Grad der Schaden nicht weiter ansteigt. Wenn die Karosserie schon stark eingedellt ist und die Windschutzscheiben zerbrochen

sind, ist es unerheblich, ob noch weitere Hagelkörner bzw. noch größere Hagelkörner einschlagen.

Die in Abbildung 20 von der Schadenempfindlichkeitsfunktion berechneten Werte stellen die Mittelwerte des Durchschnittsschadens einer bestimmten Hagelsturmgröße $D(H)$ dar. Der Unsicherheitsfaktor wird ausgedrückt durch die Standardabweichung $S_D(H)$. Dieser nimmt aufgrund der geringen Erfahrung extremer Ereignisse mit zunehmender Hagelsturmgröße und zunehmenden Durchschnittsschaden zu.

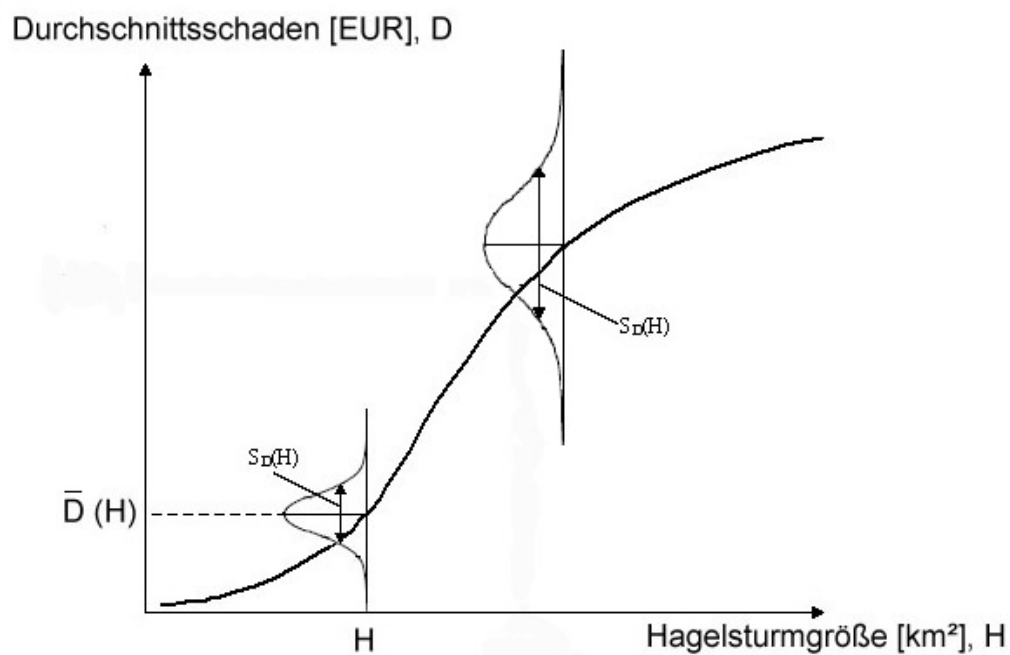


Abbildung 20: Schadenempfindlichkeitskurve

3.4 Die Schadenberechnung

Im Folgenden werden die zuvor diskutierten Module kombiniert, um den potentiellen Ereignisschaden zu berechnen. Dazu wird für jedes der 8.250 simulierten Hagelereignisse aus der Schadenempfindlichkeitskurve abgelesen, welcher Durchschnittsschaden sich aus der Hagelsturmgröße ergibt. Aus diesem wird wiederum der Durchschnittsschaden der Kern- und Randzone ermittelt. Nun kann der Gesamtschaden für jedes Hagelereignis berechnet werden, indem der Durchschnittsschaden der Kern- und Randzone multipliziert wird mit der Anzahl der betroffenen Personenkraftwagen in den beiden Zonen. Das Resultat aller Modellierungsschritte stellt eine Liste aller Hagelereignisse, deren zu erwartende Schäden für das jeweilige Portfolio sowie deren Eintrittswahrscheinlichkeit dar.

Einem Großteil der simulierten Hagelereignisse wird jedoch keine Schadensumme zugewiesen, obwohl dies nach den vorherigen Berechnungen bei den meisten Hagelereignissen der Fall wäre. Mit der Annahme in Kap. 3.1.6.1, dass in Deutschland 100 Hagelereignisse pro Jahr auftreten, sind auch diejenigen Hagelgewitter eingeschlossen, die nur Hagelkörner < 20 mm produzieren und demnach keine Schäden an Kraftfahrzeugen verursachen. Jene Hagelgewitter machen in Deutschland ca. 70-80 % aller Ereignisse aus. Um diesen Faktor zu berücksichtigen, wird 70-80 % der Hagelereignisse in einem simulierten Jahr keine Schadensumme zugewiesen. Dabei fallen überwiegend diejenigen Hagelstürme heraus, bei denen aufgrund der geringen Hagelsturmgröße auch die kleinste Wahrscheinlichkeit besteht, dass größere Hagelkörner produziert werden.

Im letzten Analyseschritt des Hagelschadenmodells werden die Resultate in ein probabilistisches Format umgewandelt. Zu diesem Zweck wird zunächst ein Zeitraum von 500 Modelljahren festgelegt. Zur Bestimmung der Anzahl der Hagelereignisse pro Modelljahr muss eine geeignete Verteilungsfunktion bestimmt werden, da die jährliche Hagelhäufigkeit einer natürlichen Variabilität unterliegt. Eine Möglichkeit stellt die Poisson-Verteilung dar. Mit dieser wird für jedes Modelljahr aus dem Hagelereigniskatalog eine bestimmte Anzahl von Hagelereignissen nach ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit ausgewählt, die der jährlichen Anzahl der Hageltage in diesem modellierten Jahr entspricht. Die Poisson-Verteilung gilt für seltene Ereignisse, d. h., wenn die durchschnittliche Anzahl der

Ereignisse das Ergebnis einer sehr großen Zahl von Ereignismöglichkeiten und einer sehr kleinen Ereigniswahrscheinlichkeit ist. Genau dies ist hier der Fall: Die Wahrscheinlichkeit, dass von den 8.250 simulierten Ereignissen des Hagelereigniskatalogs ein bestimmter Hagelsturm in einem simulierten Jahr eintritt, ist sehr gering. Das Eintreten eines Ereignisses ist dabei unabhängig von Ereignissen in anderen Zeitintervallen. Der Erwartungswert der Funktion nimmt den Wert der durchschnittlichen Anzahl der Hagelstürme pro Jahr in Deutschland an. Ein Vorteil der Poisson-Verteilung gegenüber z. B. der Binomial-Verteilung stellt die hohe Varianz dar, die es erlaubt, auch Jahre mit einer starken Anhäufung von Hagelereignissen zu simulieren. Sowohl die Poisson- als auch die Binomial-Verteilung finden häufig Verwendung bei der Modellierung der Anzahl der Tage pro Monat oder Jahr von selten auftretenden Naturphänomenen wie Hagel oder Sturm (KILLMIER, 2005 u. SAKAMOTO, 1973).

Auf der Basis der Berechnung der Schäden in den 500 Modelljahren liefert das Hagelschadenmodell folgende Informationen:

- Jährlich zu erwartender Schaden (annual expected loss)
- Wahrscheinlich höchster Schaden (PML, probable maximum loss)
- Probabilistische Schadenberechnung auf einer jährlichen Basis aller Ereignisschäden (annual aggregate loss) und des größten Ereignisschadens (annual occurrence loss)
- Schadenfrequenzkurven nach der Wiederkehrperiode (return period) und Überschreitungswahrscheinlichkeit (exceedence probability)

Im Folgenden werden die probabilistischen Ergebnisse aus der Analyse der beiden betrachteten Portfolios dargestellt und hinsichtlich ihres Einflusses auf mögliche Entscheidungen von Versicherungsunternehmen bei der Gestaltung ihrer Prämien und Rückversicherungsverträge untersucht. Aufgrund der Verwendung der Portfolios, die den totalen bzw. versicherten PKW-Bestand in Deutschland darstellen, sind Anmerkungen über die versicherungstechnische Bedeutung der Ergebnisse nur spekulativ, weil ein tatsächliches Portfolio einer Versicherung nur einen Bruchteil des Portfolios ausmachen würde. Vielmehr können die potentiellen Schäden als Schäden für die gesamte Volks- bzw. Versicherungswirtschaft angesehen werden.

Einer der Schlüsselfaktoren für ein Versicherungsunternehmen ist die Menge des Kapitals, die benötigt wird, um einen ausreichenden finanziellen Schutz gegen extreme Ereignisse zu gewähren. Der Versicherer bezieht den Großteil seiner Kapitaleinnahmen aus den Prämien der Versicherten. Er muss bei der Gestaltung der Prämien darauf achten, dass er trotz des Wunsches nach einer positiven Bilanz keine zu hohen Prämien erhebt. Risikoadäquate Prämien sind ein zentrales Qualitätsmerkmal und garantieren die Nachhaltigkeit von Geschäftsbeziehungen zwischen Versicherer und Versichertem. Es gibt eine Reihe von Faktoren, die bei der Prämiengestaltung eine Rolle spielen. Einer der wichtigsten ist der **jährlich zu erwartende Schaden**. Dieser errechnet sich aus der Summe aller Ereignisschäden durch die Anzahl der virtuellen Modelljahre und beträgt für das Portfolio des totalen PKW-Bestandes 75,1 Mio. EUR und 67,2 Mio. EUR für das Portfolio des versicherten PKW-Bestandes. Die hohe Standardabweichung des jährlich zu erwartenden Schadens von 84,7 Mio. EUR für den totalen und 76,3 Mio. EUR für den versicherten PKW-Bestand bringt zum Ausdruck, dass es sowohl Jahre gibt, in denen sehr viele Hagelereignisse mit einer hohen Intensität auftreten, aber auch Jahre mit einer niedrigen Hagelfrequenz und –intensität. Der Versicherer wird bei steigender Unsicherheit der jährlichen Schadenerwartung mit höheren Prämien reagieren. Empirische Studien haben nach WALKER (1999) gezeigt, dass Aktuarien und Underwriter bei hohen Unsicherheiten aufgrund des höheren Risikozuschlags eher zu höheren Prämien tendieren, als wenn das Risiko exakter angegeben wird.

Die Anhäufung von besonders schweren Ereignissen in bestimmten Jahren ist jedoch nicht nur für die Naturgefahr Hagel charakteristisch, sondern auch für Winterstürme, Überschwemmungen oder Hurrikans. Dagegen unterscheidet sich das Schadenpotenzial von Hagel stark mit demjenigen von Winterstürmen in Europa. Während der jährlich zu erwartende Schaden durch Hagel rund zwei Drittel desjenigen von Winterstürmen beträgt, liegt der Schaden, der alle 100 Jahre einmal auftritt, um ein achtfaches niedriger (SWISS RE, 2005). Dies ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass Hagelschläge mit einer hohen Frequenz von kleinen und mittleren Ereignissen auftreten, die in der Summe einen hohen jährlichen Schaden ergeben. Demgegenüber treten Winterstürme weitaus seltener auf, verursachen jedoch bei hohen Wiederkehrperioden größere Schäden.

Ein Versicherungsunternehmen, welches Risiken, ob Gebäude, landwirtschaftliche Güter oder Kraftfahrzeuge, gegen Hagelschlag versichert, ist demzufolge gut

beraten, bei der Prämientarifizierung als auch bei der Gestaltung seiner Rückversicherungsverträge zu beachten, dass Hagelstürme in Deutschland und in vielen andern Ländern Europas mit einer hohen Frequenz auftreten und auch bei geringen Intensitäten in der Summe zu einem hohen Kumulschaden führen.

Eine weitere wichtige Kenngröße zur Abschätzung des Schadenpotenzials ist der so genannte **PML**. Dieser wird bei der Verwendung von probabilistischen Naturkatastrophenmodellen häufig mit der Schadenfrequenzkurve bestimmt. Er dient dem Versicherer, um sich gegen extreme Schäden zu schützen, die seine Kapitalkraft übersteigen und somit zum finanziellen Ruin führen würden. Unter dem PML versteht man den geschätzten, wahrscheinlich höchsten Schaden, der nur mit einer sehr geringen Wahrscheinlichkeit eintritt. Eine praktische Definition erhalten wir von WALKER (1999), der den PML als Ereignis einer solchen Größe beschreibt, dass dieses Ereignis mit einer ungefähr 50%igen Chance ein oder mehrmals innerhalb eines durchschnittlichen Menschenlebens vorkommt. Der PML wird sehr häufig mit einer bestimmten Wiederkehrperiode in Verbindung gebracht. So gibt die Australian Prudential Regulation Authority für ihre nationalen Versicherer vor, dass diese ihre Rückversicherungsdeckung mindestens für ein 250-Jahres-Schaden berechnen müssen. Die Natural Disaster Coalition definiert dagegen den PML mit einer sehr geringen jährlichen Überschreitungswahrscheinlichkeit von 0,002, äquivalent zu einer Wiederkehrperiode von 500 Jahren.

Die Frage, welcher PML für ein bestimmtes Portfolio einer Versicherung nun der Richtige ist, lässt sich demzufolge nicht einfach lösen. Wird für die Bestimmung des PML eine Schadenfrequenzkurve herangezogen, so muss man sich bewusst machen, dass der Verlauf der Schadenfrequenzkurve ignoriert wird, mit Ausnahme des Punktes auf der Kurve, der den PML darstellt. Die Bedeutung der probabilistischen Naturkatastrophenmodellierung liegt jedoch gerade darin, dass sie Resultate über den vollen Umfang aller Wiederkehrperioden liefert. Da an dieser Stelle nicht entschieden werden soll, welcher PML für die Naturgefahr Hagel in Deutschland geeignet ist, wird auf die Angabe eines PML verzichtet.

Schadenfrequenzkurven stellen die wichtigsten Ergebnisse von Naturkatastrophenmodellen dar. Diese werden üblicherweise in einer Form dargestellt, bei der der Schaden einer **Wiederkehrperiode oder Überschreitungswahrscheinlichkeit** gegenübergestellt wird. Die Wiederkehrperiode wurde bereits beschrieben als die durchschnittliche Zeitdauer,

innerhalb derer das Ausmaß eines Ereignisses wiederholt oder übertroffen wird. Zwischen der Überschreitungswahrscheinlichkeit und Wiederkehrperiode gibt es eine eins-zu-eins Beziehung. Ein Schaden mit einer jährlichen Überschreitungswahrscheinlichkeit von p hat eine Wiederkehrperiode von $1/p$ Jahre. Das Schadenprofil in Abbildung 21 ist in der Form einer kumulativen Wahrscheinlichkeitsverteilung für das Portfolio des versicherten PKW-Bestandes in Deutschland dargestellt. Mit ihr lässt sich die Schadenhöhe zu jeder Wiederkehrperiode bestimmen. Die Punkte auf der Kurve repräsentieren Wahrscheinlichkeiten der Überschreitung des angezeigten Schadenwertes. Damit ist nicht die Wahrscheinlichkeit gemeint, dass der Schaden exakt dem Wert entspricht. Für eine Wiederkehrperiode von 500 Jahren wird ein Schaden von ca. 500 Mio. EUR angezeigt. Dies bedeutet, dass eine Wahrscheinlichkeit von 1 zu 500 besteht, dass ein Ereignisschaden von ca. 500 Mio. EUR oder mehr einmal im simulierten Zeitraum eintritt.

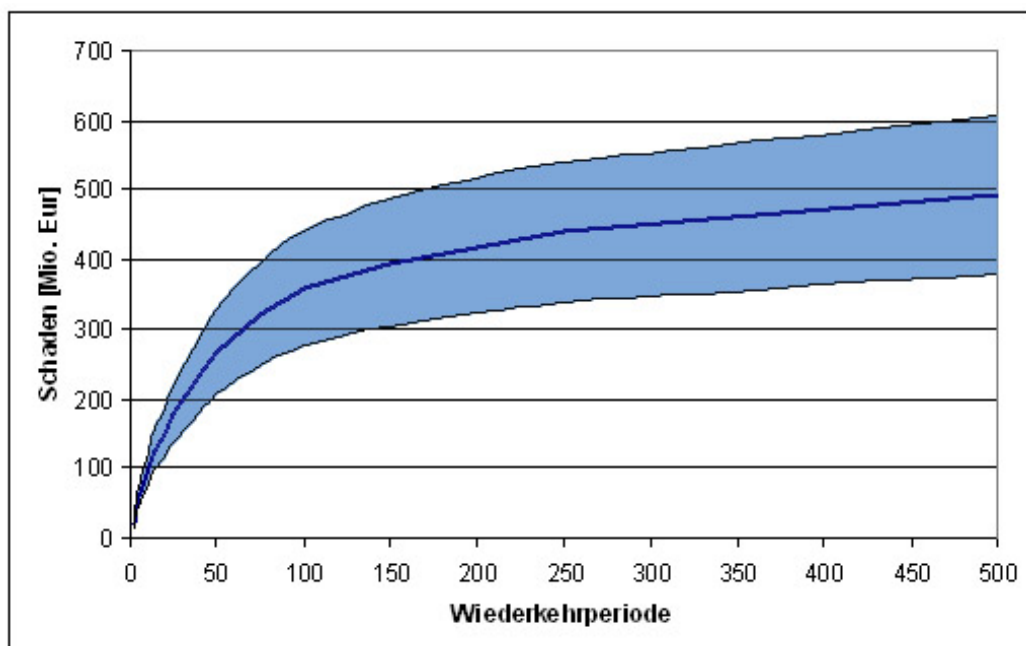


Abbildung 21: Schadenfrequenzkurve des versicherten PKW-Bestandes

Die dunkelblaue Linie stellt in Abbildung 21 die Punkte der modellierten Schadenerwartungswerte der Hagelereignisse auf der Schadenfrequenzkurve dar. Diese können jedoch aufgrund von Unsicherheiten im Modell vom modellierten Ereignisschaden abweichen. Daher wird für jedes Hagelereignis nicht bloß ein

einzelner Schadenbetrag berechnet sondern ebenfalls die volle Wahrscheinlichkeitsverteilung um den Erwartungswert. Diese Unsicherheit wird durch den hellblauen Bereich abgebildet. Dadurch werden auch unwahrscheinlichere Ereignisse in den Modellierungen berücksichtigt. Mit zunehmender Schadenhöhe wächst die Unsicherheit an. Dies hängt damit zusammen, dass Erfahrungen extremer Hagelereignisse mit hohen Schäden sehr selten sind und daher der Unsicherheitsgrad zunimmt.

Für eine ausführliche und detaillierte Validation des Schadenprofils liegen zurzeit zu wenige Informationen vor. Dennoch können einige Aussagen zum Verlauf der Kurve getroffen werden. In den Bereichen niedriger Wiederkehrperioden bis zu 50 Jahren, wo die Kurve den stärksten Anstieg verzeichnet, liegen die Schäden in einer realistischen Größenordnung. Im weiteren Verlauf steigt der Schaden nur noch langsam an. So liegt die Differenz zwischen einem 200-Jahresereignis und einem 500-Jahresereignis nur bei ca. 75 Mio. EUR. Die Schadenhöhen fallen ab Wiederkehrperioden von 50 Jahren nach eigener Einschätzung zu niedrig aus. Der Münchener Hagelsturm von 1984 richtete damals einen Schaden von 900 Mio. DM an Kraftfahrzeugen an. Würde ein Hagelsturm mit gleicher Intensität und Ausdehnung heute über dieselbe Region ziehen, läge der Schaden in einem Bereich von mindestens 800 Mio. EUR. Auch wenn dieser Hagelsturm als ein sehr extremes Ereignis angesehen werden kann, so kamen mit dem Hagelunwetter in Baden-Württemberg von 1993, das in der Ausdehnung den Münchener Hagelsturm bei weitem übertraf, sowie dem Rosenheimer Hagel von 2001, der annähernd denselben Durchschnittsschaden wie der Münchener Hagel verursachte, aber eine relativ geringe Größe hatte, zwei Hagelstürme in den letzten 15 Jahren vor, die nur deshalb keinen so hohen Gesamtschaden aufwiesen, weil keine stark urbanisierten Flächen betroffen waren.

Wo sind dafür die Ursachen im Hagelschadenmodell zu suchen? Zum einen reichen die 8.250 simulierten Hagelereignisse des Ereigniskatalogs noch nicht aus, um ein vollständiges Abbild aller theoretisch möglichen Hagelereignisse darzustellen, was sich besonders auf das geringe Vorkommen extremer Ereignisse auswirkt. Zum anderen sind Korrekturen an der Schadenempfindlichkeitskurve nötig, um extremen Ereignissen einen höheren Durchschnittsschaden zuzuweisen. Dieses würde bewirken, dass jene Ereignisse auch einen höheren Gesamtschaden verursachen.

Mit dem Hagelschadenmodell ist es nicht nur möglich, die Wahrscheinlichkeit eines einzelnen Ereignisses, sondern ebenso die Wahrscheinlichkeit aller Hagelereignisse in einem Jahr zu berechnen. Die Summe der Schäden aller Hagelereignisse in einem Jahr ist, wie Abbildung 22 deutlich zeigt, zweifelsohne weitaus größer. Man kann erkennen, dass der relative Unterschied zwischen dem größten Ereignisschaden und dem totalen Schaden aller Ereignisse in einem Jahr mit steigender Wiederkehrperiode geringer ausfällt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei hohen Wiederkehrperioden ein sehr intensives Hagelereignis, das einen hohen Schaden verursacht, die Höhe des jährlichen Gesamtschadens dominiert. Im Falle der Naturgefahr Hagel ist dieser Unterschied aufgrund der hohen Frequenz von kleinen bis mittelgroßen Ereignissen, die in der Summe bedeutend zur jährlichen Schadenhöhe beitragen, im Vergleich zu anderen Naturgefahren nicht so ausgeprägt. Bei Naturkatastrophen wie Sturm und Überschwemmung dagegen verursachen Ereignisse mit einer hohen Wiederkehrperiode im Verhältnis einen viel höheren Schaden, so dass ein einzelnes Ereignis häufig einen Anteil von über 95 % an der gesamten jährlichen Schadenlast ausmacht.

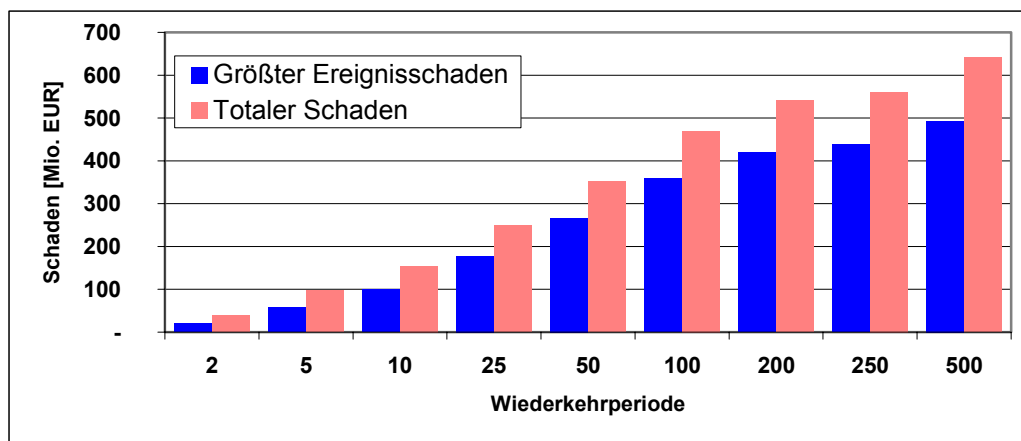


Abbildung 22: Ereignisschäden und totale Schäden des versicherten PKW-Bestandes zu ausgewählten Wiederkehrperioden

Analog dazu wurde das Schadenprofil für das Portfolio des totalen PKW-Bestandes in Deutschland erstellt, dargestellt in den Abbildungen 23 und 24. Bei einem Vergleich der beiden Schadenprofile fällt auf, dass bei jeder Wiederkehrperiode das Portfolio des totalen PKW-Bestandes einen höheren Schaden davonträgt. Dies ist nicht weiter verwunderlich, da dieses ca. 6 Mio. Kraftfahrzeuge mehr enthält.

Weiterhin ist ersichtlich, dass sich die Ergebnisse in ihrer Form und Entwicklung sehr stark ähneln. Zum einen liegt dies an der ausgeglichenen geographischen Verteilung der Kraftfahrzeuge der beiden untersuchten Portfolios. Die ca. 6 Mio. zusätzlichen Kraftfahrzeuge, die das Portfolio des totalen PKW-Bestands beinhaltet, verteilen sich verhältnismäßig auch auf Landkreise mit einer hohen Kraftfahrzeugdichte. Zum anderen bilden die Portfolios keine außergewöhnlichen Schwerpunkte von Kraftfahrzeugansammlungen in bestimmten Gebieten, wie es bei regionalen Versicherungen häufig der Fall ist.

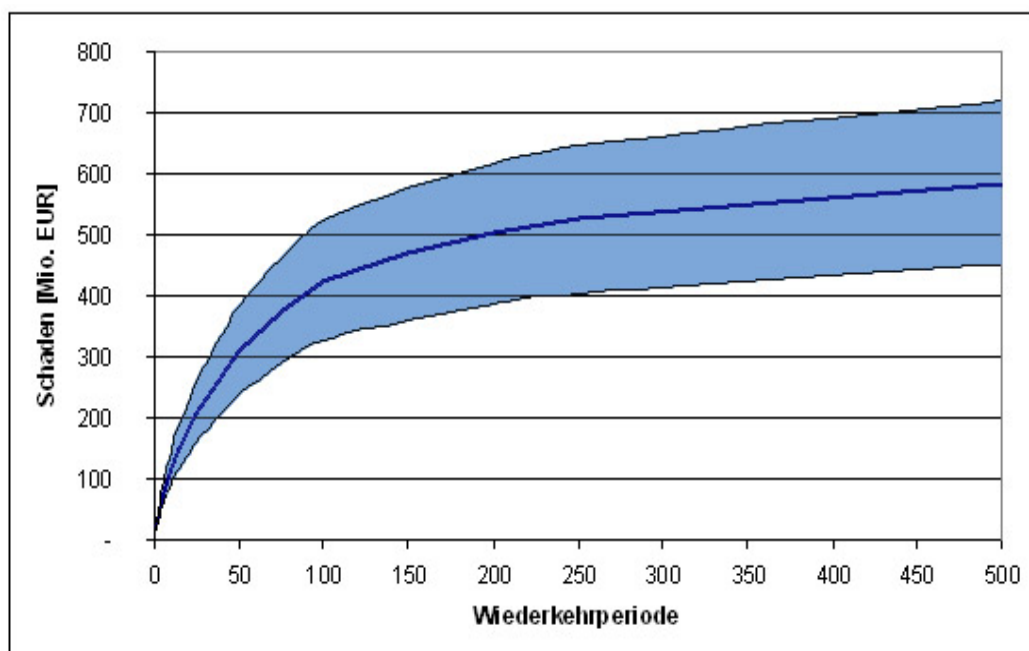


Abbildung 23: Schadenfrequenzkurve des totalen PKW-Bestandes

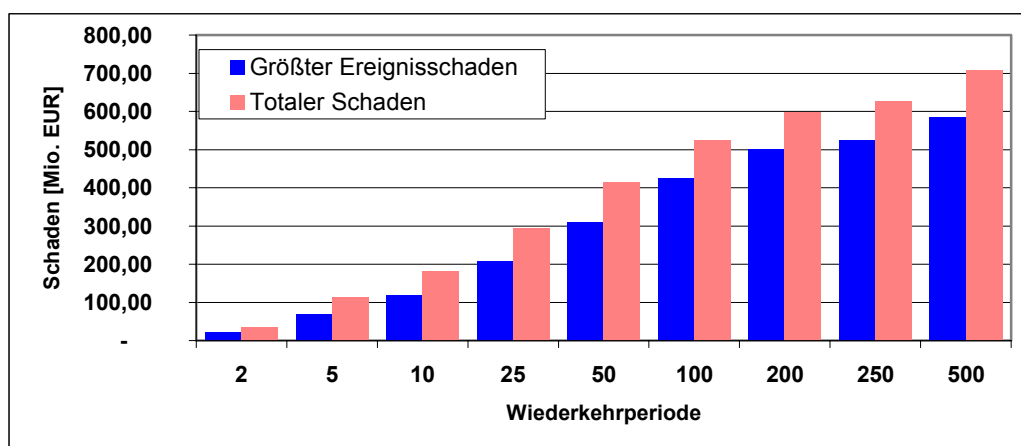


Abbildung 24: Ereignisschäden und totale Schäden des totalen PKW-Bestandes zu ausgewählten Wiederkehrperioden

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Das in dieser Arbeit vorgestellte Hagelschadenmodell basiert auf einer eingehenden und detaillierten naturwissenschaftlichen Untersuchung der Naturgefahr Hagel. Diesem Kapitel wurde aus zwei Gründen eine große Bedeutung zugemessen. Zum einen ist für den Anwender ein grundlegendes Verständnis dieses Naturphänomens bei der Bewertung der Resultate unerlässlich, zum anderen benötigt der Naturkatastrophenmodellierer selbst für eine möglichst realitätsgetreue Abbildung der Hagelereignisse eine genaue Analyse aller im Modell verwendeten Parameter.

Die Komplexität, in welcher die Parameter miteinander zusammenhängen, und die große Variabilität der Frequenz und Intensität sind z. T. aber so hoch, dass diese nicht genau erfasst werden können und daher vereinfachte Annahmen getroffen werden müssen, um sie in das Modell integrieren zu können.

Schwierigkeiten während der Modellkonstruktion entstehen häufig auch dann, wenn nur wenig qualitative Daten vorliegen. Bei der Bestimmung der Schadenempfindlichkeitskurve und der Frage, wie die Sturmgröße mit dem Durchschnittsschaden zusammenhängt, konnte nur auf die Erfahrung einiger historischer Hagelstürme zurückgegriffen werden. Ebenso wurde bei der Erstellung der Funktion der Zugrichtung davon ausgegangen, dass die Zugrichtungen von Hagelstürmen in Bayern auf ganz Deutschland übertragen werden können. Dies sind nur zwei Beispiele. Sie verdeutlichen aber, dass das Hagelschadenmodell Unsicherheiten beinhaltet, deren mögliche Effekte auf die Resultate für den Entwickler und Anwender bekannt sein sollten.

Dennoch müssen Unsicherheiten für ein Modell nicht nur bedeuten, dass diese die Qualität der Resultate nachteilig beeinflussen. In Anbetracht der großen Variabilität der Parameter ist es besonders wichtig, dass die Funktionen, die für die Abschätzung der Schäden und der Berechnung der Wiederkehrperiode verwendet werden, nicht nur auf durchschnittlichen Werten beruhen, sondern die volle Wahrscheinlichkeitsverteilung um den Mittelwert betrachten. Eine Nichtbeachtung dieser Unsicherheit hat zur Folge, dass die kalkulierten Schäden signifikant unterschätzt werden. Diese Unsicherheit wird häufig als **wissenschaftliche Unsicherheit** angegeben (WALKER, 1999). Ein zweiter Unsicherheitsfaktor kann bei der Bewertung der Resultate auftreten, wenn der Anwender des Modells nur ein

begrenztes Wissen über die Modellannahmen verfügt: Dies wird dann als die **menschliche Unsicherheit** bezeichnet. Eine differenzierte und kritische Betrachtung von Unsicherheiten im Hagelschadenmodell ist daher unerlässlich.

Im Folgenden sollen die Bereiche des Hagelschadenmodells angesprochen werden, bei denen aufgrund schlechter Datengrundlage oder mangelnder wissenschaftlicher Kenntnis noch Verbesserungen vorgenommen werden müssten:

1. Die **Vollständigkeit des Hagelereigniskatalogs** wirkt sich signifikant auf die Glaubhaftigkeit der Schadenfrequenzkurven aus. Der Hagelereigniskatalog sollte ausgehend von den Erfahrungen historischer Ereignisse alle möglichen Variationen der Parameter, die ein Hagelereignis definieren, beachten, um einen kompletten und verlässlichen Satz synthetischer Ereignisse zu simulieren. Es wurde bereits angesprochen, dass der verwendete Hagelereigniskatalog 8.250 simulierte Hagelstürme enthält. Dieser sollte in einem weiteren Schritt auf 100.000 Ereignisse vergrößert werden. Mittels einer Sensitivitätsanalyse werden diejenigen Ereignisse herausgefiltert, die redundant sind oder nach den naturwissenschaftlichen Kenntnissen nicht auftreten können, so dass nur eine Anzahl von minimal notwendigen Hagelereignissen übrig bleibt.
2. Ein bedeutender Unsicherheitsfaktor tritt bei der **Ermittlung der Hagelparameter** auf. Im Hagelschadenmodell wird für die Bestimmung der Intensität die Größe des Hagelsturms, die mit der Längen- und Breitenfunktion berechnet wird, verwendet. Auch wenn wissenschaftlich belegt ist, dass mit wachsender Hagelsturmgröße die Intensität steigt, so ist zum einen der Zusammenhang ungenau, zum anderen sind Parameter wie die Hagelkorngröße und die Windgeschwindigkeit weitaus besser geeignet, die Intensität zu beschreiben. Damit ginge die Erstellung einer neuen Schadenempfindlichkeitskurve einher, da der Durchschnittsschaden nun anhand der Hagelkorngröße und der Windgeschwindigkeit festgemacht wird.
3. **Unsicherheiten in der Schadenempfindlichkeitskurve** können einen großen Einfluss auf die Höhe des Schadens ausüben. Die Schadenempfindlichkeitskurve wurde anhand von Schadendaten aus der Versicherungswirtschaft erstellt. Die verwendeten Daten unterschieden nicht nach Kraftfahrzeugtyp oder Baujahr, so dass auch nur eine Schadenempfindlichkeitskurve erstellt werden konnte, die eine bestimmte Mischung verschiedenster Kraftfahrzeuge annimmt. Werden nun im Hagelschadenmodell Portfolios analysiert, die eine stark unterschiedliche

Kraftfahrzeugzusammensetzung haben, so können die Ergebnisse signifikant abweichen. Die Schadenempfindlichkeit von Kraftfahrzeugen kann für den gleichen Grad der Intensität eines Hagelunwetters, dem sie ausgesetzt sind, sehr stark divergieren, so dass eine Klassifizierung der Kraftfahrzeuge und die Erstellung unterschiedlicher Schadenempfindlichkeitskurven bessere Ergebnisse liefern würden.

Eine Verbesserung der Qualität des Hagelschadenmodells ist also auf unterschiedlichen Ebenen noch denkbar. Nun stellt sich die Frage, welche Qualität das Modell trotz aller Unsicherheiten zum jetzigen Entwicklungszeitpunkt hat und wie die errechneten Testergebnisse zu bewerten sind. Die in dem Kapitel der Schadenberechnung vorgestellten Resultate liegen bei einem Abgleich mit Schadendaten aus der Vergangenheit in realitätsnahen Größenordnungen. Dennoch stellen die Schadenprofile nur die Ergebnisse eines ersten Testdurchlaufs dar. Eine wichtige Aufgabe bei der Entwicklung eines Naturkatastrophenmodells liegt darin, die einzelnen Modellkomponenten zu validieren. Dies beschränkt sich nicht nur auf die isolierte Betrachtung der Einzelkomponenten, sondern schließt ebenfalls eine Gesamtanalyse sowie eine Überprüfung, in welcher Art und Weise die Module sich gegenseitig beeinflussen, mit ein. Zur Validation der simulierten Schäden eignen sich hervorragend isolierte Schadendaten einzelner Hagelstürme aus der jüngsten Vergangenheit, von denen alle relevanten Hagelparameter bekannt sind. Dabei sollte zusätzlich darauf geachtet werden, Schadendaten unterschiedlicher Versicherungen zu verwenden. Es ist wichtig anzumerken, dass alle Validationen abhängig sind von der Qualität der Daten, die die Versicherung erfasst hat. Die Validation eines Naturkatastrophenmodells ist ein sich ständig wiederholender Prozess. Mit jedem neu verfügbaren Datenpaket kann das Modell erneut kalibriert und getroffene Annahmen untermauert werden.

Und auch wenn das Hagelschadenmodell sich noch im Anfangsstadium seiner Entwicklung befindet, so können bereits jetzt glaubhafte und wertvolle Risikoeinschätzungen getroffen werden. Aufgrund einer flexiblen Methodik und der Einteilung des Modells in vier Komponenten sind Veränderungen und Erweiterungen einfach umzusetzen. Es ist denkbar, dieselbe Methodik auf andere Versicherungsbereiche anzuwenden. Neben der Kraftfahrtversicherung wird ein Versicherungsschutz gegen Hagel vor allem in den Bereichen Landwirtschaft und

Gartenbau (Gewächshäuser), Gebäude und Inhalt oder in der Luftfahrt angeboten. Dafür wäre es nötig, neue Schadenempfindlichkeitskurven zu erstellen. Ebenso käme in Betracht, Hagelschadenmodellierungen in anderen Ländern Europas vorzunehmen, wofür wiederum zusätzliche Daten über länderspezifische Hagelfrequenzen erforderlich wären.

5 Literatur

- Bauer-Messmer, B. u. A. Waldvogel (1996): Satellite data based detection and prediction of hail. *Atmospheric Research* **43**, 217-231
- Bill, R. (1999): Grundlagen der Geo-Informationssysteme. Band 1: Hardware, Software und Daten. 4.Auflage, Heidelberg
- Brimelow, J. C., Reuter, G. W. u. E. R. Poolman (2002): Modeling maximum hail size in Alberta thunderstorms. *Weather and Forecasting* **17**, 1048-1062
- Browning, K. A. (1977): The structure and mechanisms of hailstorms. *American Meteorological Society Monograph* **38**, 1-43
- Browning, K. A. u. G. B. Foote (1976): Airflow and hail growth in supercell storms and some implications for hail suppression. *Quart. J. Roy. Met. Soc.* **34**, 499-533
- Changnon, S. A. (1971a): Note on hailstone size distribution. *Journal of Applied Meteorology* **10**, 168-170
- Changnon, S. A. (1971b): Hailfall characteristics related to crop damage. *Journal of Applied Meteorology* **10**, 270-274
- Changnon, S.A. (1972): Examples of economic losses from hail in the United States. *Journal of Applied Meteorology* **1**, 1128-1137
- Changnon, S. A. (1984): Temporal and spatial variations in hail in the upper Great Plains and Midwest. *Journal of Climate and Applied Meteorology* **23**, 1531-1541
- Changnon, S.A. (1997): Surrogate data to estimate crop-hail loss. *Journal of Applied Meteorology* **36**, 1202-1210
- Changnon, S.A. u. N.A. Barron (1970): Quantification of crop-hail losses by aerial photography. *Journal of Applied Meteorology* **10**, 86-96
- Changnon, S.A. u. J. Burroughs (2002): The Tristate hailstorm: the most costly on record. *Monthly Weather Review* **131**, 1734-1739
- Charlton, R.B., Kachmann, B.M. u. L. Wojtiw (1995): Urban hailstorms: a view from Alberta. *Natural Hazards* **12**, 29-75

- Delobbe, L., Dehenauw, D., Hamid, K. u. J. Neméghaire (2003): Hail detection using radar observations: case studies in the summer 2002. Royal Meteorological Institute of Belgium. *Publication scientifique et technique* N^R 029
- Dessens, J. (1986): Hail in southwestern France. I: Hailfall characteristics and hailstorm environment. *Journal of Climate and Applied Meteorology* **25**, 35-47
- Dessens, J. (1995): The problem of hail suppression as seen by Helmut Weickmann. *Atmospheric Research* **38**, 3-7
- Dessens, J. (1998): A physical evaluation of a hail suppression project with silver iodide ground burners in southwestern France. *Journal of Applied Meteorology* **37**, 1588-1599
- Fraile, R., Berthet, C., Dessens, J. u. J. L. Sánchez (2003): Return periods of severe hailfalls computed from hailpad data. *Atmospheric Research* **67-68**, 189-202
- Fraile, R., Castro, A., López, L., Sánchez, J. L. u. C. Palencia (2003): The influence of melting on hailstone size distribution. *Atmospheric Research* **67-68**, 203-213
- Frisby, E. M. u. H. W. Sansom (1967): Hail incidence in the tropics. *Journal of Applied Meteorology* **6**, 339-354
- Giaiotti, D., Nordio, S. u. F. Stel (2003): The climatology of hail in the plain of Friuli Venezia Giulia. *Atmospheric Research* **67-68**, 247-259
- Gokhale, N. R. (1975): Hailstorms and hailstone growth, New York
- Grossmann, M. (1982): Rückversicherung. Eine Einführung. 2. Auflage, St. Gallen
- Hagedorn, R. (2006): Schuld war nur der Hagel. Information des SWR3 Verkehrszentrums
- Hey, M. H. F. u. P. R. Waylen (1987): Probabilities of daily hail and thunder occurrences. *Journal of Climate and Applied Meteorology* **20**, 1014-1020
- Hohl, R., Schiesser, H-H. u. I. Knepper (2002): The use of weather radars to estimate hail damage to automobiles: an exploratory study in Switzerland. *Atmospheric Research* **61**, 215-238
- Jäger, E. (1987): Zur Vektor-Raster-Transformation. In: 4. Kontaktstudium am Institut für Kartographie der Universität Hannover (unveröffentlicht)

- Killmier, S. (2005): Exploring unknown quantities. Centre for Actuarial Studies. Melbourne. *Research Paper No 123*, 1-36
- Kleinschroth, S. (1999): Untersuchungen über den möglichen Einfluss des Naturraumes auf Entstehung und Verlauf von Hagelgewittern am Beispiel Bayern und Baden-Württemberg. München (Diplomarbeit im Fachbereich Geographie an der Ludwig-Maximilians-Universität München)
- Krauss, T. W. u. J. R. Santos (2004): Exploratory analysis of the effect of hail suppression operations on precipitation in Alberta. *Atmospheric Research* **71**, 35-50
- Kurz, M. (1986): Die Entwicklung der Wetterlage des Münchener Hagelunwetters vom 12. Juli 1984. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes* Nr. **170**, Offenbach am Main
- Leigh, R. (1998): Hail damage to motor vehicles: an examination of economic costs. Natural Hazards Research Centre, Macquarie University Sydney, Australia
- Leigh, R. u. I. Kuhnel (2001): Hailstorm loss modelling and risk assessment in the Sydney region, Australia. *Natural Hazards* **24**, 171-185
- Lindloff, V. (2003): Hagel – Jedes Jahr Schäden in Millionenhöhe. Aus: *Kurier – Das Bayer CropScience Magazin für die moderne Landwirtschaft*. Heft **2**, 18-21
- Long, A. B. (1980): On estimating hail frequency and hailfall area. *Journal of Applied Meteorology* **19**, 1351-1362
- Ludlam, F. H. (1961): The hailstorm. *Weather* **16**, Chapter 7, 8
- McMaster, H. (2001): Hailstorm risk assessment in rural New South Wales. *Natural Hazards* **24**, 187-196
- Middleton, W. E. K. (1965): A history of the theories of rain and other forms of precipitation. Franklin Watts, New York
- Morgan, G. M. u. N. G. Towery (1976): On the role of strong winds in damage to crops and its estimation with a simple instrument. *Journal of Applied Meteorology* **15**, 891-898
- Morgan, G. M. (1998): Hail. <http://151.8.71.18/~www/it/comprensione/morgan/hail/two.htm> (abgerufen am 11.1.2006)

- Münchener Rück (Hrsg., 1984): Hagel, Immenstadt
- Münchener Rück (Hrsg., 1997): Hail risk study. 24th congress of the international association of hail insurers, Zürich
- Münchener Rück (Hrsg., 1999): Naturkatastrophen in Deutschland. Schadenerfahrungen und Schadenpotenziale, München
- Omoto, Y. u. H. Seino (1978): On relationship between hailfall characteristics and crop damage. *J. Agric. Meteor. Tokyo* **34**, 65-76
- Risk Frontier (Hrsg., 2003): HailAUS 2.1 User's Manual, Sydney
- Sakamoto, C. (1973): Application of the Poisson and Negative Binomial Models to thunderstorm and hail days probabilities in Nevada, *Monthly Weather Review* **101**, 350-355
- Sánchez, J. L., Fraile, R., Rodríguez, P. u. A. Castro (1996): Crop Damage: the hail size factor. *Journal of Applied Meteorology* **35**, 1535-1541
- Schiesser, H. H. (1988): Fernerkundung von Hagelschäden mittels Wetterradar untersucht an Ackerkulturen. Zürich (Dissertation an der Philosophischen Fakultät II der Universität Zürich)
- Schiesser, H. H., Waldvogel, A., Schmid, W. u. H. Huntrieser (1995): The mesoscale structure of severe precipitation systems in Switzerland. *Monthly Weather Review* **123**, 2070-2097
- Schmitt-Lermann, H. (1984): Der Hagel und die Hagelversicherung in der Kulturgeschichte, München
- Schwind, M. (1957): Die Hagelhäufigkeit in der Bundesrepublik Deutschland. *Mitteilungen aus dem Institut für Raumforschung*, Heft **36**
- Simeonov, P. (1996): An overview of crop hail damage and evaluation of hail suppression efficiency in Bulgaria. *Journal of Applied Meteorology* **35**, 1574-1581
- Sioutas, M. V. u. H. A. Flocas (2003): Hailstorms in northern Greece: synoptic patterns and thermodynamic environment. *Theoretical and Applied Climatology* **75**, 189-202

- Smith, P. L., Johnson, R. u. D. L. Priegnitz (1997): An exploratory analysis of crop hail insurance data for evidence of cloud seeding effects in North Dakota. *Journal of Applied Meteorology* **36**, 463-473
- Süring, R. (Hrsg., 1939): Lehrbuch der Meteorologie, Leipzig
- Swiss Re (Hrsg., 2005): Hagelstürme in Europa. Neuer Blick auf ein bekanntes Risiko. 1-8
- Towery, N. G., Changnon, S. A. u. G. M. Morgan (1976a): A review of hail-measuring instruments. *Bulletin American Meteorological Society* **57**, 1132-1140
- Towery, N. G., Morgan, G. M. u. S.A. Changnon (1976b): Examples of the wind factor in crop-hail damage. *Journal of Applied Meteorology* **15**, 1116-1120
- Vinet, F. (2001): Climatology of hail in France. *Atmospheric Research* **56**, 309-323
- Waldvogel, A., Federer, B. u. P. Grimm (1979): Criteria for the detection of hail cells. *Journal of Applied Meteorology* **18**, 1521-1525
- Waldvogel, A. (1997): Hagelstürme und Klimaänderung. 24. Kongress der Internationalen Vereinigung der Hagelversicherer vom 22.-24. September 1997 in Stockholm, Zürich
- Walker, G. (1999): Current developments in Catastrophe Modelling. Catastrophe Modelling Working Party 1999, Sydney
- Webb, J. D. C., Elsom, D. M. u. D. J. Reynolds (2001): Climatology of severe hailstorms in Great Britain. *Atmospheric Research* **56**, 291-308
- Wojtiw, L. (1975): Climatic summaries of hailfall in Central Alberta (1957-1978). Atmospheric Science Rept. 75-1, Res. Counc. of Alberta, Edmonton
- Wojtiw, L. u. J. H. Renick: (1973): Hailfall and crop damage in Alberta. *Alberta Research Hail Studies Report*, Nr. **73-1**, 7-10

6 Dank

Mein erster Dank gilt Herrn Prof. Dr. Otto Klemm für die fachliche Betreuung und seine ständige Erreichbarkeit auch in seinem Forschungssemester.

Ich möchte mich herzlich bei meinem Betreuer Stefan Beine bedanken, der immer ein offenes Ohr für mich hatte und durch seine Anregungen und fachlichen Rat viel zum Gelingen der Diplomarbeit beigetragen hat.

Frau Dr. Angela Hinterding schulde ich einen großen Dank für die Unterstützung, die sie mir in der schwierigen Anfangszeit gegeben hat.

Ein besonderes Dankeschön geht an Herrn Gilles André, der mir in allen Fragen der Programmierung stets geholfen hat und ohne den diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Für seinen fachlichen und sehr geduldigen Rat in allen mathematischen Bereichen möchte ich Herrn Dr. Heiko Frings danken.

Den lieben Mitarbeitern der Benfield München GmbH danke ich herzlich für die freundliche Aufnahme im Team.

Meinem Freund Olaf Ehlers sei an dieser Stelle für seine juristischen Kommentare zu den Allgemeinen Bedingungen der Kraftfahrtversicherung gedankt.

Außerdem möchte ich mich noch bei meinen schnellen und gründlichen Lektoren Jürgen, Marco und Arne Deepen bedanken.

7 Anhang

Anhang A: Wetterlagentypen nach der europäischen Großwetterlagenklassifikation, die optimale Bedingungen für die Entwicklung von hagelbildenden Gewitterzellen bieten

Großwetterlage			Verwandte Wetterlagen	Zirkulationsform
Nr.	Wcode	Beschreibung		
1	WA	Westlage antizyklonal	WZ, BM	zonal
2	WZ	Westlage zyklonal	WS, WA	zonal
10	BM	Hochdruckbrücke über Mitteleuropa	WA, HM, HNFA	gemischt
28	TB	Tief brit. Inseln	SZ, SA, SWZ, SWA	meridional
29	TRW	Trog Westeuropa	SWZ, SWA	meridional

	Monat max. Häufigkeit	Witterung
Nr.		
1	Aug/Sept	bei Frontdurchgang zeitweise durch Stau, verstärkte Niederschläge und Gewitter
2	Juli/Aug	Frontgewitter
10	Nov/Dez	heiter und trocken, bei einzelnen Frontdurchgängen auch Durchzug von Regengebieten, im Hochsommer Gewitter
28	Mai/Aug	in der wärmeren Jahreszeit vielfach gewittrige und dabei recht ergiebige Niederschläge, im Sommer schwül-warm
29	Juli/Aug	wie unter Nr. 28, TB

Anhang B: Intensitätsskala der „Tornado and Storm Research Organisation“ zur potentiellen Schadeneinschätzung von Hagelstürmen (WEBB et al., 2001)

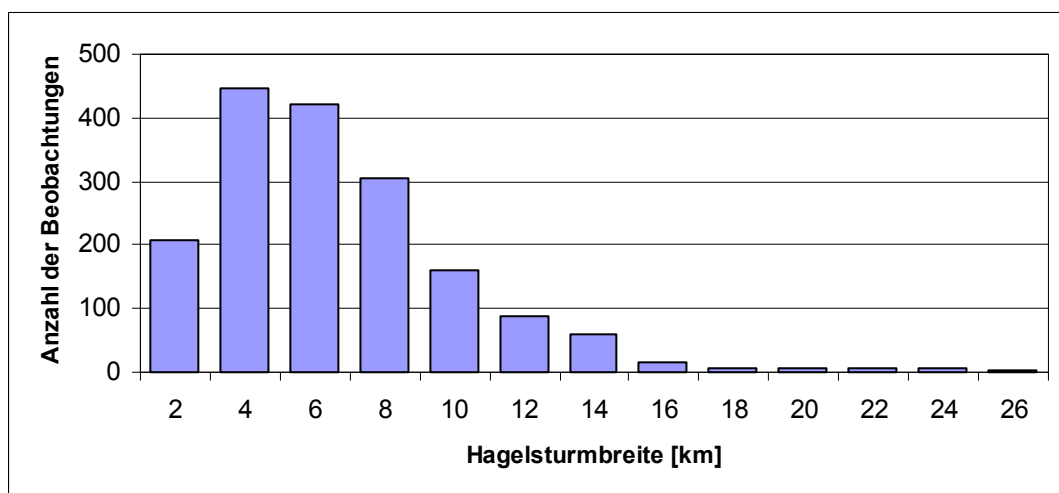
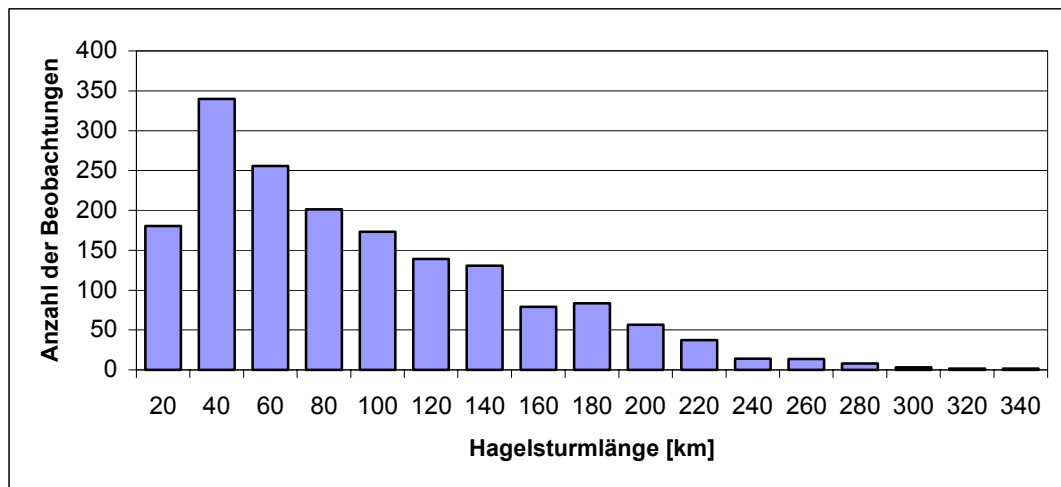
The TORRO Hailstorm Intensity Scale (H0 to H10) in relation to typical damage and hail size codes. Size codes are presented in Table 2

H	Typical damage	Size code
0	True hail of pea size, but no damage.	1
1	Leaves holed, flower petals cut.	1–3
2	Leaves stripped from trees and plants; vegetables, fruit, and crops bruised and scarred; vegetable leaves shredded.	1–4
3	A few panes in glasshouses, cloches, and/or skylight windows broken; wood (fences) scored; slight chipping of paintwork on window ledges and vehicles; caravan bodywork dented; perspex roofing holed; canvas (e.g. tents) torn; stems of crops severed and seeds threshed; fruit sliced/split.	2–5
4	Some vertical house windows and/or vehicle windscreens broken/cracked; glasshouses extensively damaged; some felt or asbestos cement roofs pierced; paint scraped off walls and vehicles; some thin car bodywork visibly dented; small branches broken from trees; unprotected birds and poultry killed; firm ground pitted.	3–6
5	Some slate roofs and pottery-type tiles broken; many windows smashed; plate glass roofs and reinforced glass windows broken; bodywork of most exposed cars visibly pitted; bodywork of light aircraft pitted; risk of serious or fatal injuries to small animals; strips of bark torn from trees; woodwork pitted and splintered; large branches cut from trees.	4–7
6	Many roof slates and tiles (except concrete) broken; shingle and thatch roofs breached; corrugated iron and some sheet metal roofs scored, and a few holed; brick walls slightly pitted; wooden window frames broken away.	5–8
7	Slated, shingle, and many tiled roofs shattered, exposing rafters; metal roofing punctured; brick and stone walls visibly pitted; bodywork of cars and light aircraft seriously/irreparably damaged.	6–9
8	Concrete roof tiles cracked; sheet metal, shingle, and most tiled roofs destroyed. Pavements pitted; bodywork of commercial aircraft severely damaged; small tree trunks split apart; risk of serious injury to persons caught in the open.	7–10
9	Concrete walls pitted; concrete roof tiles widely broken; walls of wooden houses completely holed; large tree trunks cut down; risk of fatal injury to persons caught in the open.	8–10
10	Wooden houses destroyed; brick-built houses very severely damaged; risk of fatal injury to unprotected persons.	9–10

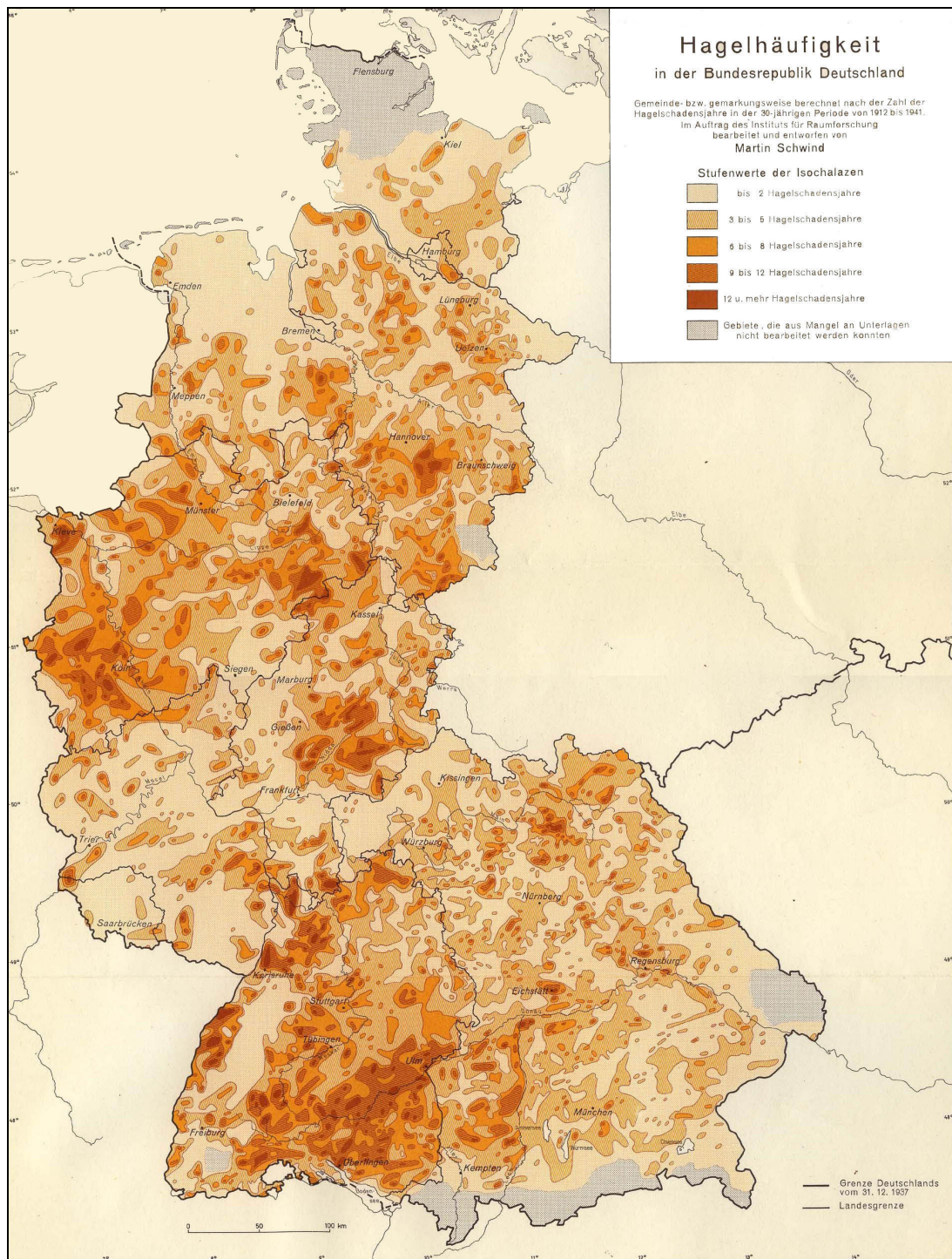
Hail size and diameter in relation to TORRO Hailstorm Intensity Scale

Size code	Diameter (mm)	Description	Intensity range
1	5–10	Pea	0–2
2	11–15	Mothball, bean, hazelnut	0–3
3	16–20	Marble, cherry, small grape	1–4
4	21–30	Large marble, large grape, walnut	2–5
5	31–45	Chestnut, pigeon's egg, golf-ball, table-tennis ball, squash ball	3–6
6	46–60	Hen's egg, small peach, small apple, billiard ball	4–7
7	61–80	Large peach, large apple, goose egg, small/medium orange, tennis ball, cricket ball, baseball	5–8
8	81–100	Large orange, grapefruit, softball	6–9
9	101–125	Melon	7–10
10	over 125	Coconut, etc.	8–10

Anhang C: Verteilung der Hagelsturmlängen und –breiten Bayern (verändert nach: KLEINSCHROTH, 1999)



Anhang D: Hagelgewitterhäufigkeit in der Bundesrepublik Deutschland
(SCHWIND, 1957)



Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

München, Juli 2006