

Ueber die Beziehung Hagelfall - Gebäudeschäden: Fallstudie “Luzern-Hagelsturm” vom 21. Juli 1998

Pilotstudie erstellt für die

Partner Re
Weinplatz 10, 8022 Zürich

von

H.-H. Schiesser, R. Hohl und W. Schmid
Institut für Atmosphärenphysik
ETH-Hönggerberg, 8093 Zürich

in Zusammenarbeit mit der
Gebäudeversicherung des Kantons Luzern

und mit der Unterstützung des
Instituts für Disaster Risk Management
(DRM)

Zürich, im September 1999

Inhalt

Summary	2
Zusammenfassung	3
1. Einleitung	4
2. Daten	5
2.1 Radar	5
2.2 Schaden	5
2.2.1 Kulturen	5
2.2.2 Gebäude	6
2.3 Windinformationen	6
3. Beziehung Radar - Schaden (Methode)	7
3.1 Bestimmung der kinetischen Hagelenergie aus Radarmessungen	7
3.2 Abschätzung der Hagelkorndurchmesser	8
3.3 Hagelenergie - Schaden an Maiskulturen	9
4. Hagelenergie - Gebäudeschäden vom "Luzern-Sturm"	10
4.1 Datenüberblick Luzern-Sturm	10
4.2 Stratifikationsschema	10
4.3 Resultate	11
4.3.1 Fassadenmaterialien	11
4.3.2 Dachmaterialien	13
4.4 Hagelenergie - Anteil betroffener Policen	14
4.5 Hagelenergie - Gebäudeschäden vom "Knutwil-Sturm"	15
5. Vergleich mit weiteren Stürmen	16
6. Schlussfolgerungen	18
Referenzen	20
Figuren und Anhang	21

Summary

On July 21, 1998 a severe hailstorm hit the city of Lucerne and its agglomeration (Lucerne-storm). The storm initiated damage on buildings in the order of 70 Million Swiss Francs. The event was observed by the research radar at the Institute for Atmospheric Science (ETH-Zurich) and the intensities of the hailfall were measured. In earlier studies, good relationships between radar measurements of hail and the corresponding damage on agriculture (e.g. wheat, corn) have already been established. Hence, the question arises whether a good relationship can also be obtained comparing radar-derived measurements and hail damage on buildings. So far, due to the lack of damage data, this question has not been tackled before.

The presented study deals with the mentioned problem using data from the Lucerne-storm. Initially, the total kinetic hail energy, produced at one spot by the storm, had to be computed from the radar-derived measurements with a fine spatial resolution. The obtained energy values were related to the damage on buildings. Furthermore, it was necessary to collect data from the damaged buildings, which appeared to be a major effort, since the data have to be extracted from the damage report of each building. In addition, the spatial location of the building was determined, in order to relate spatially both values (radar and building). However, the established data base is still small (with 230 objects). Therefore, the presented results should be thought as first hints about the possibility to estimate the amount of hail damage on buildings by using radar measurements.

Using only a stratification according to the insured value of the entire building or main components of a building (roof, facade), no direct relationship is obtained. The damage has to be further stratified according to the hit material of the building components. Roof materials (like tiles or "eternit"-plates) or facade materials (like plaster or paint), that cover a large part of the buildings' surface, show the best relationship between the kinetic hail energy and the particular damage. Large differences can be found depending on whether the object was hit in the part of the storm with severe wind gusts or in a more calm part; buildings showing overproportional damage were all situated in the "severe wind zone" of the storm. On the contrary, materials, which do not cover a large surface but rather appear as individual elements on the roof (like sheet metal covers, roof windows) or of the facade (like window shades or metal pipes for rain water) are often completely replaced instead of being repaired. As a result, the amount of damage does not depend on storm severity and no clear increase of the damage extent with increasing kinetic hail energy is obtained. The "surface"-material should be weighted with a factor representing somehow those building elements in order to get the best estimation.

A comparison between the Lucerne-storm and a stronger as well as a weaker storm is presented at the end of this study. The stronger storm occurred on August 21, 1992 and passed the city of Lucerne only a few kilometers towards the north. Severe damage occurred mainly in agricultural areas and in forest stands on Mount Rigi. The weaker storm of June 2, 1999 hit two villages in the northern part of Kanton Lucerne. Some minor damages on buildings were collected within the framework of this study (about 40 objects) and compared with radar measurements. The values can successfully be placed into the relations obtained by the data of the Lucerne-storm.

It is recommended to refine the present data base (register the amount of damage for every hit material - so far the integral amount was used) and to collect more objects. The recalculated relationships should then be verified on data obtained from a further independent storm, preferably with a similar severity as the Lucerne-storm.

Zusammenfassung

Am 21. Juli 1998 ging ein starkes Hagelgewitter über der Stadt Luzern und Umgebung nieder. Es entstanden u.a. Gebäudeschäden von etwa 70 Mio Franken. Das Gewitter wurde mit dem Forschungsradar des Instituts für Atmosphärenphysik an der ETH-Zürich beobachtet und die Niederschlagsintensitäten wurden vermessen. Zwischen den aus solchen Radarmessungen errechneten kinetischen Hagelenergien und den Hagelschäden an landwirtschaftlichen Kulturen (z.B. Getreide, Mais) konnten in früheren Forschungsarbeiten gute Beziehungen nachgewiesen werden. Es stellt sich daher die Frage, ob dies auch mit den Hagelschäden an Gebäuden möglich ist. Diese Frage konnte bis anhin, mangels entsprechender Schadendaten, nicht untersucht werden.

Die vorliegende Studie versucht daher, anhand der Daten des Luzern-Sturmes dieser Frage nachzugehen. Einerseits musste aus den Radardaten - räumlich fein aufgelöst - die totale beim Durchzug des Sturmes produzierte vertikale kinetische Hagelenergie berechnet werden. Andererseits war eine Erhebung der Gebäudeschäden nötig, welche sich aufwendig gestaltete, da die Informationen aus den Schadendossiers von jedem einzelnen Objekt zu erfassen waren. Zusätzlich war eine Lokalisation der Objekte im Untersuchungsgebiet nötig, damit sie den Radardaten räumlich zugeordnet werden konnten. Daher ist der für diese Pilotstudie erfasste Datensatz noch klein (etwa 230 Objekte). Die gefundenen Resultate sind als erste Hinweise aufzufassen, auf die Möglichkeit, Gebäudeschäden mittels Radarmessungen abzuschätzen.

Mit einer Stratifikation der Gebäude nach Gebäudewert oder nach Gebäudeteil (Dach oder Fassade) zeigt sich noch keine direkte Beziehung. Der Schaden muss weiter nach den betroffenen Materialien unterteilt werden. Die flächenhaften Materialien, wie Ziegel oder Eternit beim Dach oder Putz und Farbanstrich bei der Fassade, ergeben die besten Beziehungen zwischen der kinetischen Hagelenergie und dem Schaden. Dabei finden sich grosse Unterschiede im Schadenbild, je nachdem, ob der Hagel in einer Starkwindzone oder in ruhigeren Zonen innerhalb des Sturmes fällt. Die Gebäude, welche überproportionalen Schaden aufwiesen, befanden sich durchwegs in der Starkwindzone. Materialien dagegen, welche nicht flächenhaft, sondern als Elemente im Dach (z.B. Blechabdeckungen, Dachfenster) oder in der Fassade (z.B. Jalousien, Dachwasserabläufe) aufscheinen und eher zufällig den grossen Hagelkörnern ausgesetzt sind (Treffer oder nicht Treffer), werden oft unabhängig von der Stärke des Schadens einfach ausgewechselt, was den Schaden vereinheitlicht. Daher ist keine klare Zunahme mit höheren Energiewerten zu entdecken. Der flächenhafte Schaden müsste daher mit einem Faktor gewichtet werden, welcher diese Elemente in etwa repräsentiert.

Die Studie endet mit einem Vergleich des Luzern-Sturmes mit dem grösseren und intensiveren Sturm vom 21. August 1992, der einige Kilometer nördlich von Luzern vorbeizog und hauptsächlich landwirtschaftlich genutzte Regionen und Waldgebiete beeinträchtigte sowie einem vergleichsweise schwächeren Sturm vom 2. Juni 1999, von dem leichte Gebäudeschäden (ca. 40 Objekte) im nördlichen Kantonsteil von Luzern erfasst werden konnten. Diese unabhängig erfassten Schäden lassen sich gut in die entsprechenden Beziehungen des Luzern-Sturmes einfügen.

Es wird empfohlen, die noch kleine Datensammlung zu verfeinern (Schaden für jedes betroffene Material gesondert erfassen - bis jetzt wurde der integrale Schaden verwendet) und auf mehr Objekte auszuweiten. Die damit berechneten Beziehungen sollten dann an einem weiteren, ähnlich intensiven Hagelsturm verifiziert werden.

1. Einleitung

Der starke Hagelsturm über Luzern vom 21. Juli 1998 entwickelte sich im Berner Oberland, zog durch das Entlebuch und intensivierte sich in der Region Schwarzenberg und Malers. Ueber dem Stadtgebiet von Luzern erreichte er einen zweiten Höhepunkt in der Hagelintensität. Nach Luzern verlor der Sturm rasch an Intensität und war in Bezug auf Hagel nicht mehr gefährlich.

Solche "Urban"-storms oder Stadtstürme verursachen in den dicht besiedelten Agglomerationen grosse Schäden an Automobilen und an Gebäuden. In den letzten Jahren ereigneten sich einige berühmt-berüchtigte Hagelstürme, welche unmittelbar ein grosses städtisches Gebiet trafen wie z.B. München 1984 (Kurz 1985), Genf 1986, Edmonton 1987 (Carlton et al. 1998), Basel 1992 (Huntrieser et al. 1994) oder Sydney 1999 (NHRC 1999, Partner Re 1999). Der Luzern-Sturm verursachte der Gebäudeversicherung des Kantons Luzern (GVL) einen Schaden von etwa 70 Mio Fr. (GVL 1998), was für schweizerische Verhältnisse eine beachtliche Schadensumme darstellt.

Seit 1983 wurden anhand von Radarbildern der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt (SMA) die stärksten Hagelzüge in der Schweiz nördlich des Hauptalpenkammes systematisch erfasst (Schiesser et al. 1997). Es zeigte sich, dass die Zugbahnen hoher Niederschlagsintensitäten gut mit dem Vorkommen von Schäden in der Landwirtschaft übereinstimmen. Es bestehen auch Studien mit Daten aus dem Hagelabwehrexperiment Grossversuch IV (1977-86, Federer et al. 1986), welche eine gute Beziehung zwischen der radarvermessenen kinetischen Hagelenergie und den Schäden an verschiedenen Kulturen aufzeigen (Schiesser 1988, 1990). Bisher wurde jedoch noch nie der Versuch unternommen, die räumlich detailierte Radarinformation in Beziehung zu Gebäudeschäden zu bringen. Gelänge dies, dann könnte das Schadenpotential (versicherte oder unversicherte Werte) von ganzen Hagelzügen oder Gewittersystemen, welche über ein Siedlungsgebiet ziehen, abgeschätzt werden.

Die Fallstudie soll daher zeigen, wie gut sich eine Beziehung zwischen einem physikalischen Mass der Hagelintensität, der kinetischen Hagelenergie und dem Schaden an Gebäuden herstellen lässt. Da die Hagelzelle vom 21. Juli 1998 über der Stadt Luzern ihre höchste Intensität erreichte, gibt es von dort viele Schadeninformationen von Gebäuden. Solche Daten standen bis anhin für Vergleiche mit Radarmessungen in Gewittern nicht zur Verfügung. Da, wie oben erwähnt, frühere Untersuchungen an Ackerkulturen eine gute Beziehung zwischen der radarvermessenen vertikalen kinetischen Hagelenergie und der Schadenhöhe, ausgedrückt in Schadenprozenten, zeigte, sollte es möglich sein, dies auch für Gebäudeschäden zu erhalten. Solche Beziehungen lassen dann auch Vergleiche mit anderen Stürmen zu, welche möglicherweise noch grösser und intensiver waren, aber keine grösseren Siedlungsgebiete heimsuchten. Ein solcher Vergleich kann mit dem Sturm vom 21. August 1992 durchgeführt werden, welcher knapp nördlich von Luzern durchzog und dadurch hauptsächlich landwirtschaftlich genutztes Gebiet und Wald verwüstete. Dieser Sturm könnte etwas nach Süden verschoben über Luzern gelegt werden und so die noch grösseren Schäden eines "worst case" abgeschätzt werden.

Im folgenden soll zuerst ein Ueberblick über die vorhandenen Daten gegeben werden (Kapitel 2), dann wird die Methodik zur Berechnung der kinetischen Hagelenergie erläutert (Kapitel 3). Im Kapitel 4 wird die Beziehung Hagelenergie - Gebäudeschäden entwickelt, und es werden einige Resultate vorgestellt. Anschliessend vergleichen wir noch den Luzern-Sturm mit einem stärkeren und einem schwächeren Sturm, und Kapitel 6 mit den Schlussfolgerungen soll die Studie abschliessen.

Die Figuren werden nach dem Text und den Referenzen im Bericht eingefügt und sind entsprechend den dazugehörigen Kapiteln nummeriert.

2. Daten

2.1 Radar

Von 1311 (UTC = 1511 Lokalzeit) bis 1508 (UTC = 1708 Lokalzeit) sind Volumenmessungen der Radarreflektivität und der Dopplergeschwindigkeit in der Hagelzelle vom 21. Juli 1998 mit dem ETH Dopplerradar auf dem Hönningerberg in einer zeitlichen Auflösung von 2.5 Minuten durchgeführt worden. Der Sturm befand sich etwa um 16 Uhr Lokalzeit über der Stadt Luzern. Figur 2.1 gibt einen Ueberblick über die Zugbahn des Hagelsturmes und über das Hagelgebiet, welches aus den Radarreflektivitäten errechnet wurde.

2.2 Schaden

Damit später in der Studie eine gute Zuordnung der Gebäudeschäden zu den entsprechenden Radarwerten durchgeführt werden kann, wird zuerst mit den Schäden an den Kulturen eine Aneicherung an früher berechnete Abhängigkeiten der Schadenhöhe von der Hagelintensität durchgeführt. Dazu wird gleich vorgegangen, wie in den Studien vom Grossversuch IV (Schiesser 1988, 1990). Eine Aehnlichkeit der Schadenkurven gibt uns eine gewisse Sicherheit, dass wir die richtigen Radarwerte den Gebäudeschäden zuordnen. Dazu brauchen wir vom aktuellen Sturm eine Anzahl geschädigter Felder, welche im Gelände zu lokalisieren sind.

2.2.1 Kulturen

Landwirtschaftliche Schäden wurden der Schweizerischen Hagelversicherung aus einigen luzernischen Gemeinden gemeldet: Entlebuch, Escholzmatt, Hasle, Romoos, Schüpfheim, Werthenstein, Emmen, Müswangen, Adligenswil, Honau, Kriens, Littau, Luzern, Malter, Meierskappel und Schwarzenberg. Vor allem in der Region Schwarzenberg hat es grosse Kulturschäden an Obstbäumen gegeben (bis 100% Schaden). Für unser Untersuchungsgebiet (Figur 2.1) sind aus den Schadenprotokollen der Hagelversicherung folgende Daten erhoben worden: Adresse des betroffenen landwirtschaftlichen Betriebes, Art der Kultur (Mais, Winterweizen, Kartoffeln etc), Flurname, Grösse des Feldes (in Aren), Schadenanteil (%) und ev. Information über den Reifezustand der Kultur. Die genaue Lage (nur der Flurname) der Felder ist aber nicht bekannt und wird bei der Versicherung auch nicht benötigt. Daher mussten, um die entsprechende Information zu erhalten, in den für die Analyse relevanten Gemeinden (Schwarzenberg und Malter im Westen bis Adligenswil und Udligenswil im Osten) die Landwirte angeschrieben werden, mit der Bitte, die Felder in einem zugesandten Plan (1:25'000) einzuzeichnen oder die Schwerpunktskoordinaten anzugeben. 34 von 54 angeschriebenen Betrieben (63 %) haben geantwortet und 61 geschädigte Felder konnten dadurch lokalisiert werden. Von 44 % dieser Felder konnte der Standort anhand von Luftbildern, welche einige Tage nach dem Sturm im Gebiet geflogen wurden, verifiziert werden. Die Felder waren im schlimmsten Fall 50 bis 100 m neben dem richtigen Ort, was im Vergleich zur Auflösung vom Radarbild genügt. Die häufigste Kulturart war Mais mit 51 Feldern (84%) und Schäden zwischen 5 und 100%. Weitere erhobene Kulturen waren Winterweizen (5 Felder), Korn (2), Futterrüben (2) und ein Kartoffelfeld. Figur 2.2.a zeigt die räumliche Verteilung der erfassten

Felder, stratifiziert nach der Schadenhöhe. Alle beschädigten Kulturen liegen an der nördlichen Flanke des Sturmes, da dort Ackerbaugebiete vorhanden sind. Auf der südlichen Seite hingegen hat es hügeliges Gelände, zu den Voralpen aufsteigend, auf welchem vorwiegend Graswirtschaft betrieben wird und daher keine Ackerkulturen beschädigt werden konnten.

2.2.2 Gebäude

Der Sturm hat nach Angabe der Gebäudeversicherung des Kantons Luzern (GVL 1998) etwa 10'000 Gebäude mehr oder weniger stark beschädigt, jedes zweite Gebäude in der Kernzone und jedes vierte Gebäude in der Randzone des Hagelgebietes. Stark betroffen sind die Gemeinden (von West nach Ost in Zugrichtung des Sturmes) Schwarzenberg, Malter, Kriens, Horw, Luzern, Adligenswil und Meggen, etwas schwächer die Gemeinden Littau, Ebikon und Udligenswil. Von den Gebäuden ist, wie bei den Kulturen, der Standort nicht mittels einer zugeordneten Koordinate bekannt. Wiederum mussten über die Adresse des Gebäudestandortes unter Benützung von Stadt- und Ortsplänen (meist 1:10'000) die Koordinaten manuell bestimmt werden, damit es überhaupt möglich war, die Schäden den Radarmessungen zuzuordnen. Auch über die Schadenart war von der Versicherung nichts erhoben worden, so dass eine eigene Erhebung notwendig war.

Ein Erhebungsblatt (s. Anhang A1) wurde entwickelt, in welches man die entsprechenden Daten aus den einzelnen Schadendossiers der Gebäudeversicherung einfüllte. Neben der Adresse, Gebäudeart, Versicherungswert und Schadenssumme wurde vor allem nach Gebäudeteil (Dach, Fassade) und den Bau-Materialien (hierarchisch nach zunehmender Hagelgefährdung) aufgeschlüsselt. Von jedem Gebäude wurde ein solches Blatt ausgefüllt und dann elektronisch gespeichert. Ein Ausschnitt vom Datensatz ist im Anhang A2 zu finden. Die Kolonnennummern entsprechen den Rubriken im Erhebungsbogen.

Bis jetzt konnten etwa 230 Gebäude für diese Arbeit vom Luzern-Sturm erfasst werden. Deren geografische Verteilung innerhalb des Sturmgebietes ist aus Figur 2.2.b ersichtlich. Es wurde versucht, aus allen Gemeinden und - wichtiger noch - aus unterschiedlich stark verhaltenen Gebieten Objekte zu erfassen. Dazu vergleiche man Figur 3.1, wo die räumliche Verteilung der Hagelenergie dargestellt ist.

40 Gebäude wurden von einem weiteren Sturm erfasst, der am 2. Juni 1999 im nördlichen Teil des Kanton Luzerns wütete und Knutwil wie St. Erhard heimsuchte. Der Sturm erreichte etwa 1/3 der maximalen Energiewerte (Tabelle 5.1) vom Luzern-Sturm, lässt aber Vergleiche mit den leichteren Gebäudeschäden zu (Abschnitt 4.5).

2.3 Windinformationen

Sturmböen spielen in einem Hagelsturm eine wichtige Rolle, sind aber kaum messbar, ausser eine Wetterstation ist direkt betroffen. Die flächenhafte Information fehlt aber vollständig. Am 21. Juli 1998 sind an der automatischen Messstation Luzern der SMA (ANETZ) zur Sturmzeit Windspitzen bis zu 30 m/s gemessen worden. Dies ist im Vergleich mit vielen starken Hagelstürmen, von welchen Spitzenböen gemessen werden konnten, ein relativ hoher Wert (Egli 1996). Von 71 erfassten Sturmphasen während der Jahre 1991-95 mit ANETZ-Messungen, erreichten nur 4 (5.6%) 30 m/s oder mehr.

Die anderen beiden Stationen, welche entlang des Sturmes liegen, Napf und Pilatus, zeigten Werte von 12.0, respektive 14.4 m/s. Diese beiden Stationen waren nicht mehr direkt im Sturmfeld mit Hagel. Die Windrichtungen am Boden konnten etwas besser erfasst werden, einerseits durch Angaben aus Schadenprotokollen (z.B. Bemerkung Westfassade betroffen) und andererseits durch Interpretation von den im Abschnitt 2.2.1 erwähnten Luftbildern. Dort

liess sich die Windrichtung aus der Fallrichtung umgeworfener Bäume bestimmen. Eine gewisse Windstärke lässt sich diesen Orten noch zuordnen, da Bäume bei einer Sturmstärke ab Beaufort 9-10 umgeworfen werden, was einer Böenspitze von etwa 50 m/s und mehr entsprechen würde. Da aber nur vereinzelt Bäume niedergestürzt sind, wurden solche Geschwindigkeiten wohl nur selten und sehr lokal erreicht. Auch fallen geschwächte Bäume früher, was hier der Fall gewesen sein könnte. Zum Vergleich, Beaufort 9-10 erreichte der Sturm vom 21. August 1992, welcher nördlich von Luzern vorbeizog (s. Kapitel 5). In der Zugbahn wurden Spitzenböen von 48.3 m/s von der ANETZ-Station Glarus registriert.

Figur 2.2.c zeigt die erfassten Windrichtungen (Pfeile) an den entsprechenden Standorten. Hauptsächlich wurde der Hagel am Boden von West oder Südwest herangetrieben, aber auch andere Richtungen sind erkennbar, welche auf turbulenteren Regionen mit möglichen "Downbursts" (starke Fallwinde) schliessen lassen; so auf der rechten Seite des Sturmes in Zugrichtung, welche als divergierende Pfeilbündel ersichtlich sind. Diese starken Fallwinde stimmen gut mit Radarstudien von anderen starken Stürmen überein, welche Schmid et al. (1997) in der Schweiz analysiert haben.

3. Beziehung Radar - Schaden (Methode)

3.1 Bestimmung der kinetischen Hagelenergie aus Radarmessungen

a) Volumenmessung in 2.5 (resp. 5) Minutenauflösung vom ETH-Forschungsradar. Die Radarreflektivität wird für jeden Zeitschritt auf ein Gitter mit einer Auflösung von $0.25 \times 0.25 \text{ km}^2$ (resp. $0.5 \times 0.5 \text{ km}^2$) umgerechnet, in einem Gebiet von $240 \times 240 \text{ km}^2$ oder 960×960 (resp. 480×480) Radarpixel. Ein CAPPI (horizontaler Schnitt durch das Radarvolumen) auf einem möglichst tiefen Niveau (hier auf 1.5 km ü.M.) wird normalerweise für die Vergleiche verwendet (etwa 1 km über Grund). Da das niedrige Niveau im Falle vom 21. Juli 1998 wegen Abschwächung oder Abschattung des Radarstrahles (durch starken Niederschlag zwischen der Zelle und dem Radar, respektive durch die Topographie) für unsere Analyse ungünstig ist, müssen höhere Niveaus gewählt werden und die Radarreflektivitäten auf das untere Niveau extrapoliert werden.

b) Extrapolation der Radarreflektivität von einem CAPPI auf höherem Niveau auf das Niveau 1.5 km ü.M., d.h. etwa 1 km über Boden. Radarprofile, d.h. die vertikale Veränderung der Radarreflektivität durch die Veränderung der Grösse und Zustands der Niederschlagspartikel (Grössenspektrum) während des Fallens, werden dazu verwendet (Schmid und Waldvogel 1986). Für diese Arbeit musste das bestehende Profil jedoch der spezifischen Sturmgrösse angepasst werden. Vergleiche an drei anderen Stürmen ähnlicher Grösse und Intensität, von welchen auf dem unteren Niveau direkte Messungen zur Verfügung standen, zeigen eine gute Übereinstimmung der globalen Energiewerte (pro Minute) der direkten Messungen mit der von oben extrapolierten Messung. Mit der Extrapolation lässt sich auch der zeitliche Verlauf sehr gut rekonstruieren. Die Energie-Kurven auf beiden Niveaus zeigen in allen Fällen eine Verschiebung von 5 bis 6 Minuten auf der Zeitachse. Diese Zeitverschiebung entspricht der Fallzeit der Hagelkörner mit einem mittleren Durchmesser von 1.5 cm über eine Fallhöhe von 4500 m.

c) Umrechnung der Radarreflektivität Z in den Fluss der kinetischen Energie E (an einem Punkt im Raum) mit einer Beziehung (Waldvogel et al. 1978a, 1978b), welche im Hagelabwehrexperiment Grossversuch IV (Federer et al. 1986) erarbeitet und verwendet wurde:

$$E (\text{Punkt}) = 5 \times 10^{-6} Z^{0.84} \quad (1)$$

wobei E (Punkt) in $\text{Joules/m}^2\text{s}$ und Z in mm^6/m^3 . Für eine Punktmessung (ein Pixel) wird der Fluss der kinetischen Energie über die gesamte Zeit, solange im Radarelement Reflektivitäten gemessen werden, integriert. Will man einen globalen Energiewert erreichen, dann wird er noch über die Fläche integriert. Reflektivitätswerte ab 45 dBZ (Zelle) werden erfasst, wobei Reflektivitäten ab 56 dBZ für die Energieberechnung verwendet werden (Grenze Regen - Hagel).

d) Berechnung der totalen kinetischen Hagelenergie pro Radarpixel ($0.25 \times 0.25 \text{ km}^2$) durch Integration über die Zeit, in welcher der Sturm diese Fläche beeinflusst. Die Einheit wird in Joule/m^2 (J/m^2) angegeben. Dieser Wert wird mit dem Schadenausmass am Boden verglichen. Da alle 2.5 Minuten eine Radarmessung vorhanden ist, wird, um eine Minutenauflösung zu erhalten, zwischen den 2.5 Minuten-Zeitpunkten interpoliert. Dies lässt Vergleiche mit Ergebnissen vom Grossversuch IV zu, welche in Minutenauflösung zur Verfügung stehen. Zugleich kann die Dauer des Hagelfalles besser erfasst werden (Dauer in Minuten). Die maximale Radarreflektivität kann für jeden Pixel erfasst werden, welche eine erste Schätzung über die maximale Hagelkorngrösse gibt. Die Figur 3.1 zeigt die räumliche Verteilung der kinetischen Hagelenergie im Untersuchungsgebiet. Da diese Variable mit der Dauer des Hagelfalles und der maximalen Radarreflektivität hoch korreliert (s. dazu Figur 3.3), wird für die Berechnung der Beziehung zwischen Hagelfall und Schadenhöhe die kinetische Hagelenergie weiter verwendet.

3.2 Abschätzung der Hagelkorndurchmesser

Im Hagelabwehrexperiment Grossversuch IV sind viele Hagelkornspektren mittels Hageldetektoren gemessen worden (Federer et al. 1986). Daher sind maximale Hagelkorndurchmesser und die Anzahl Körner in verschiedenen Grössenklassen für viele Standorte und für viele Gewitter bekannt. Hier werden die Spektren verwendet, welche eine Hagelkorngrösse von mindestens 20 mm aufweisen, eine Grösse, welche bei Autos erste Schäden hervorruft. Figur 3.2 zeigt zwei Streudiagramme, worin einerseits die maximale Korngrösse in Abhängigkeit der kinetischen Hagelenergie dargestellt wird (a), respektive die Anzahl Körner (pro m^2) in Bezug zur Hagelenergie (b). Für die maximale Korngrösse sehen wir einen Trend zu grösseren Körnern mit der Zunahme der Energie. Aus der Studie von Smith und Waldvogel (1987) wissen wir, dass im näheren Umkreis um einen Messpunkt immer noch grössere Körner als die gemessenen gefunden werden, welche im Mittel etwa 10 mm grösser sind.

In Figur 3.2.b erkennen wir eine Zunahme der Anzahl Hagelkörner bis etwa 600 J/m^2 , darüber muss mit einem grösseren Anteil an grossen Körnern gerechnet werden, um auf den entsprechenden Energiewert zu kommen. Die Anzahl nimmt dann nicht mehr zu. Leider hat man nur wenige Spektren zur Verfügung, welche einen hohen Energiewert liefern, solche sind naturgemäss selten.

Für die Schäden an Gebäuden sind die grossen Körner von Wichtigkeit, da einzelne Körner die Materialien durchschlagen können, und eher weniger geschieht durch eine grosse Anzahl von kleineren Körnern. Das steht im Gegensatz zu den Kulturen, wo einzelne grosse Körner nicht von Relevanz sind, jedoch viele Körner mit einer mittleren Korngrösse einen grossen Schaden anrichten können.

3.3 Hagelenergie - Schaden an Maiskulturen

Um die Radarwerte den Gebäudeschäden am Boden zuordnen zu können, werden sie an den Maiskulturen angeeicht, da von solchen Schäden Vergleichswerte aus früheren Arbeiten vorhanden sind (Schiesser 1988, 1990). Die vom Radar erhaltenen Hagelenergien werden mit dem Schaden an den Maisfeldern (51 Felder stehen zur Verfügung) kreuzkorreliert, d.h. man verschiebt im Umkreis von 2-4 km die Radarpixel entsprechend zu den Feldstandorten, und dies in 0.25 km Schritten nach Norden, Süden etc. Für eine Matrix von bis zu 2 km Distanz von dem Standort ergeben sich 289 (17x17) Korrelationsberechnungen mit dem Datensatz der Felder. So erhält man ein Korrelationsfeld, und das Ausfallen des Hagels von der Radarmesshöhe zum Boden wird aus der Richtung der besten Korrelation angenommen. Zugleich erhält man auch die Korrelation vom senkrechten Fall, d.h. wenn die Abwinde sehr schwach wären. Solche Korrelationen wurden von Schmid et al. (1992) für einige Stürme vom Grossversuch IV mittels Vergleich Radar - Hageldetektoren errechnet. Somit stehen auch Vergleichsdaten für die Verschiebungsvektoren Radarmessebene - Boden zur Verfügung.

Für die aktuelle Berechnung wurden die beiden gut unterscheidbaren Intensitätszentren (s. Figur 3.1) getrennt behandelt und anschliessend die beiden Datensätze für die Berechnung der kombinierten Beziehung wieder zusammengesetzt. Dies lässt sich mit verschiedenen Fallrichtungen während der unterschiedlichen Lebensstadien des Sturmes begründen.

Für das Zentrum im Osten (Luzern) errechnete man einen Verschiebungsvektor aus SE aus einer Distanz von etwa 1 km zum Standort des Feldes. Das ergäbe einen Fallwinkel von etwa 45 Grad (Annahme Fallhöhe noch 1 km von der extrapolierten Radarmessebene). Der Korrelationskoeffizient zeigte einen guten Wert von 0.73. Für das Zentrum West (Malters) war dies nicht so eindeutig, es gab mehrere Korrelationen in der Grössenordnung von 0.5 - 0.65, die Werte waren aber alle eher zu niedrig. Es wurde dann keine Verschiebung angenommen, da die Energiewerte sich am ehesten im erwarteten Bereich bewegten, insbesondere ein Schaden von 100 %, an dessen Wert angeeicht werden konnte. Zusätzliche Vertikalschnitte entlang der Zugrichtung des Sturmes zeigen, dass der Hagel eher in einem steileren Winkel ausfiel.

Diese Fallrichtung hat nichts mit der Fallrichtung zu tun, den der Hagel knapp über dem Boden erhält. Letztere wird durch das Auseinanderdivergieren des Abwindes in der Grenzschicht verursacht und zeigt in unserem Sturmbeispiel hauptsächlich Aufprallrichtungen aus W oder SW (Figur 2.3).

In Figur 3.3 sind 6 Streudiagramme mit dem Datensatz der besten Verschiebung dargestellt. Die ersten drei Diagramme vergleichen die drei Radarvariablen Energie, Dauer und maximale Radarreflektivität untereinander, die restlichen drei die Radarvariablen mit jeweils dem Schaden an Maiskulturen. Figur 3.3.d ist diejenige, welche mit früheren Arbeiten verglichen werden kann. Die Beziehung Energie-Schaden zeigt eine Korrelation von 0.64. Die höheren Werte müssten mehr nach rechts zu liegen kommen, d.h. etwas grössere Energiewerte für die höheren Schäden aufweisen. Es wird vermutet, dass durch die Abschwächung eines 5 cm Radars (im Vergleich zum 10 cm Radar im Grossversuch IV) bei hohen Niederschlagsintensitäten die maximale Reflektivität zu niedrig gemessen wird und daher die Energiewerte etwas niedriger ausfallen. Trotzdem darf aus den obigen Resultaten gefolgert werden, dass eine vernünftige Beziehung erhalten werden kann. Die Aneichung an bekannte Beziehungen aus dem Grossversuch IV (10 cm Radar, keine Abschwächung, knapp über dem Boden gemessen) ist möglich. Es erscheint daher gerechtfertigt, die Analyse mit den Gebäudeschäden durchzuführen.

4. Hagelenergie - Gebäudeschäden

4.1 Datenüberblick vom Luzern-Sturm

In der kurzen für diese Pilotstudie zur Verfügung stehenden Zeit konnte nur eine kleine Datensammlung erfasst werden, nämlich 233 Gebäude aus einer Grundgesamtheit von fast 10'000 beschädigten Objekte. Als Ueberblick werden die Wertepaare kinetische Hagelenergie versus relativer Schadenanteil (in Promille des Versicherungswertes) von den 227 geografisch zuortbaren Gebäuden in verschiedenen Streudiagrammen dargestellt. In Figur 4.1 werden sie nach dem Versicherungswert unterteilt (a-d). Dieser Wert ist jeweils - in Klammern gesetzt - aus der Titelzeile der Figuren ersichtlich. Alle Gebäude zusammengefasst sind in der Figur 4.1.e zu finden. Zusätzlich sind in allen Figuren die Wertepaare mit zwei verschiedenen Symbolen nach Wohngebäude (Viereck) und andere Gebäude (Dreieck) unterschieden worden. In Figur 4.2 dagegen werden die Wertepaare nach Gebäudeteilen stratifiziert (a-d), sowie Energiewerte nach den verschiedenen Materialien (e und f) aufgetragen.

Keines der Streudiagramme lässt auf eine direkte Beziehung schliessen. Die Kategorien Gebäudewert oder Gebäudeteil scheinen dafür noch ungeeignet zu sein. Auch die Materialien zeigen keinen "typischen" tiefsten Hagelenergiewert, wo der Schaden beginnt.

Dieser Befund fällt gleich aus, falls an Stelle des relativen Schadenanteils der absolute Schaden (in Franken) verwendet wird. Es ist daher notwendig, nach den einzelnen Materialien, aus denen die Dächer oder die Fassaden hauptsächlich bestehen, zu stratifizieren.

4.2 Stratifikationsschema

Figur 4.3 zeigt ein Schema, wie die Daten unterteilt werden können, dies unter Berücksichtigung der noch kleinen Datensammlung, welche für diese Studie zur Verfügung steht. Nur Dachschäden gab es an 16 Objekten aus total 227 (7%), nur Fassadenschäden dagegen an 120 (53%) Gebäuden. Von den restlichen Gebäuden wurden Schäden von Dach und Fassade gemeldet (Kategorie 3 mit 91 Objekten oder 40% Anteil). Als Schadenanteil wurde bei der Schadenerfassung der totale Wert aus den Schadenprotokollen entnommen. Eine Unterteilung nach Dach und Fassade für die Kategorie 3 wäre wünschenswert. Dies müsste in einer weiterführenden Datenerhebung von Beginn an gemacht werden. Hier wird, um dieses Erhebungsmanko zu umgehen und um eine grössere Anzahl Wertepaare für Dächer oder Fassaden zu erhalten, der Schaden nach einem Schlüssel aufgeteilt, der von der Gebäudegrösse abhängt. Es wird angenommen, dass bei einem kleineren Gebäude der Anteil der Dachfläche grösser ist als bei grossen Gebäuden. Als Mass für die Gebäudegrösse wird der Versicherungswert verwendet.

Für die Aufteilung wählte man folgenden Schlüssel (Dach : Fassade): Für kleinere Gebäude mit einem Versicherungswert bis 0.5 Mio Fr. das Verhältnis 30 : 70, für mittlere Gebäude mit einem Versicherungswert zwischen 0.5 und 1 Mio Fr. ein Verhältnis 20 : 80 und für grosse Gebäude mit einem Wert von über einer Mio das Verhältnis 10 : 90. So erhalten wir für alle Dächer eine Anzahl Wertepaare von 107 und für alle Fassaden 211 Wertepaare, welche im folgenden entsprechend der Materialien stratifiziert werden.

Nach Gebäudewert und Bebauungsart (dicht bebaut = städtisch, locker bebaut = ländlich) wird in dieser Studie nicht unterteilt. Um die Materialien nach diesen beiden Kategorien noch weiter zu unterteilen, ist der Datensatz noch zu klein.

Der hier angewandte Schlüssel für die Aufteilung von Dach- und Fassadenschaden mag im Einzelfall abweichen. Die Werte zeigen aber nach der Aufteilung eine ähnliche Grössenordnung wie die Werte von "nur Dach" oder "nur Fassade".

In den folgenden beiden Abschnitten werden die kombinierten Gebäudeteile nach den Materialien auf ihre Hagelanfälligkeit weiter untersucht.

4.3 Resultate

4.3.1 Fassadenmaterialien

In Figur 4.4 werden die Streudiagramme Hagelenergie versus Schadenanteil für die Kategorie 2 "nur Fassade" dargestellt. Diese Schadenanteile sind nicht durch Dachschäden verfälscht und können als Bezugswerte für die Kategorie 5 "alle Fassaden" benützt werden (Schadenanteil nach Dach und Fassade). Für die Kategorie 2 werden keine Regressionsgeraden und Korrelationskoeffizienten präsentiert, da die Wertepaare ähnlich verteilt sind wie in der Kategorie 5 "alle Fassaden" und mehr Wertepaare benötigt würden. Dies zeigt sich insbesondere für die Materialien 2 (Eternit), 3 (Holz) und 6 (Farbanstrich). Wir berechnen daher die Beziehungen zwischen der kinetischen Hagelenergie und dem Schadenanteil für die Kategorie 5 mit der grösseren Anzahl Wertepaare.

Figur 4.5 zeigt die gleiche Auswertung wie in Figur 4.4, aber für die Kategorie 5 "alle Fassaden". Einige Regressionen konnten berechnet werden, und die Geraden (als ausgezogenen Linien) sind in den entsprechenden Figuren eingetragen worden. Man muss aber in Erinnerung behalten, dass bei der Erhebung der Schäden nur dasjenige Material registriert wurde, welches am meisten Hagelenergie zur Beschädigung braucht. Der Schadenanteil könnte u.U. daher noch von anderen Materialien beeinflusst sein. Die Streudiagramme in Figur 4.5 werden im folgenden in der Reihenfolge a-h besprochen.

a) **Putz**: Zwei Ausreisser fallen im Diagramm auf, die anderen Punkte deuten jedoch eine Zunahme des Schadenanteils mit zunehmender Hagelenergie an. Der Korrelationskoeffizient r (ohne Berücksichtigung der beiden Ausreisser-Wertepaare $< 100 \text{ J/m}^2$, > 10 Promille) beträgt 0.77. Die höheren Schadenanteile der beiden Ausreisser lassen sich auf einen hohen Anteil an beschädigten Lamellenstoren zurückführen. Diese Gebäude lagen in Zonen, wo starke Abwinde (Downbursts, s. auch Figur 2.2.c) vermutet werden müssen, d.h. die Windgeschwindigkeiten waren an dieser Stelle einiges höher als in den anderen Gebieten des Hagel-schlages. Der Standort der Gebäude mit Putzschäden ist in Figur 4.6.a dargestellt und zeigt auch die Lage der überproportional beschädigten Gebäude, welche sich auf der rechten Seite des Sturmes (in Zugrichtung) befindet.

b) **Eternit**: Eine gute Beziehung erhält man mit den Werten $> 400 \text{ J/m}^2$ mit einer Korrelation von $r = 0.95$. Die zwei Wertepaare mit sehr wenig Energie haben einen beträchtlichen Schadenanteil durch Lamellenstoren und befinden sich auch in der Starkwindzone (Figur 4.6.b). Vermutlich wurden dort die Eternitplatten, durch von starken Sturmwinden getriebenen Hagelkörnern, beschädigt. Ansonst kann man folgern, dass ab etwa 300 J/m^2 eine Beschädigung von Eternit durch die entsprechend grossen Hagelkörner möglich ist. Nach Hageldetektorenmessungen muss bei dieser Hagelenergiemenge mit Körnern von 30 mm Durchmesser gerechnet werden (s. Figur 3.2.a).

c) **Holz, Schindeln**: Die Regression wurde ohne das Wertepaar > 60 Promille Schadenanteil berechnet, da sich dieses Gebäude auf der Starkwindseite des Sturmes befand. Allgemein ergibt sich eine schwache Korrelation von $r = 0.23$ (ausgezogene Gerade). Möglicherweise sollte hier eine Trennung zwischen einer Chaletverschalung aus Holz und einer Schindelfas-

sade gemacht werden. Dann ergeben sich möglicherweise andere Regressionsgeraden, beispielsweise die gestrichelt eingetragenen Geraden.

d) **Metall:** Hier ist kein Zusammenhang zu erkennen. Dies lässt sich auf die unterschiedlichen Metalle zurückführen, z.B. Kupfer, verzinktes Eisenblech, Metallabdeckungen, Fassadenelemente aus unterschiedlichen Blechen und Blechdicken. Es dürften eigentlich nur flächenhafte Metallverkleidungen in die Untersuchung einbezogen werden, welche dem Hagel nicht so zufällig ausgesetzt sind wie Blechabdeckungen oder Ablaufrohre, wo der Zufall mitspielen muss, damit ein grösseres Korn direkt auftrifft. Auf jeden Fall müsste nach Metallart und Elementart eine Unterscheidung getroffen werden. Eine Aussage über die Anfälligkeit in Bezug zur Hagelenergie kann daher noch nicht gemacht werden.

e) **Kunststoff:** Da gibt es noch zu wenig Daten, um einen Hinweis zu erhalten. Ein grösseres Problem wird hier wahrscheinlich das Alter vom Kunststoff sein, wie Untersuchungen der EMPA an Dichtungsmaterialien und Fassadenelementen aus Kunststoff zeigen (Flüeler und Rupp 1987). Da nur wenige Daten von solchen Materialien vorhanden sind, wird hier darauf nicht weiter eingegangen.

f) **Farbanstrich:** Bei diesem Material haben wir die grösste Anzahl Wertepaare und es zeichnet sich eine eindeutige Separierung in zwei Punktwolken ab. Diejenigen Punkte mit den höheren Schadenanteilen zeigen eine sehr hohe Korrelation von $r = 0.89$. Der höhere Schadenanteil ist eindeutig auf stärkere Winde (die Gebäude liegen in den vermuteten starken Abwindzonen, s. Figur 4.6.c) an der rechten Flanke des Sturmes zurückzuführen. Zusätzlich wird der Schadenanteil durch viele beschädigte Lamellenstoren erhöht. Die zweite flachere Regressionsgerade wurde mit den Daten der zweiten, im Diagramm unteren Punktwolke berechnet. Diese Beziehung erhält einen Korrelationskoeffizienten von 0.33, einen Zusammenhang andeutend.

g) **Nur Jalousien:** In diesem Diagramm sind Schäden aufgetragen, welche ausschliesslich Jalousien betreffen, d.h. Fensterläden, Rolläden, Lamellenstoren, Sonnenstoren. In der Figur sind die Lamellenstoren von den restlichen mit einem Dreiecksymbol unterschieden worden. Man sieht, dass die grösseren Anteile (ab 8 Promille) Lamellenstoren betreffen. Einen Trend zu einer Schadenzunahme mit höherer Energie zeichnet sich nicht direkt ab. Es kommt vermutlich darauf an, wieviele Storen zum Zeitpunkt des Hagelschlages heruntergelassen sind. Wird ein Lamellenstoren beschädigt, dann wird er ersetzt, gleichgültig, ob er schwach oder stark beschädigt wurde. Die Reparatur erfolgt daher unabhängig von der Stärke des Hagels. Fensterläden, z.B. diejenigen aus Holz werden frisch gestrichen, solche fallen dann unter die Rubrik Farbanstrich.

h) **Fensterglas:** In diesem Diagramm finden sich ausschliesslich Glasschäden, kein anderes Material wurde beschädigt. Wir finden eine Anhäufung um die 200 J/m^2 und dann noch drei Fälle mit 600 J/m^2 und mehr. Ein Ausreisser befindet sich bei einem Schadenanteil von etwa 40 Promille. Bei 200 J/m^2 fallen Körner von 20 bis 25 mm Durchmesser (Figur 3.2.a), welche ein dünnes Einfachglas zerschlagen können. Bei 600 J/m^2 finden sich Körner von 30 bis 40 mm Durchmesser, welche dickeres Glas zerschlagen könnten. Solche Beziehungen müssten in einer weiteren Studie genauer untersucht werden. In der Figur wurden zwei mögliche Regressionsgeraden gestrichelt eingezeichnet. Die eine steilere und früher beginnende für dünnere Scheiben und die zweite flache und später beginnende für dickere Gläser.

Bis jetzt wurde der relative Schadenanteil, der sich auf die Versicherungssumme des Gebäudes bezog, für die Vergleiche verwendet. In Figur 4.7 werden in der gleichen Art wie in Figur 4.5 Streudiagramme gezeigt, diesmal aber für die Wertepaare kinetische Hagelenergie versus absoluter Schaden (angegeben in 1000 Fr. oder kFr). Für Putz, Eternit und Holz erkennen wir ähnliche Streuungen der Punkte und denkbare Regressionsgeraden könnten berechnet werden, wie man dies für den relativen Schaden durchgeführt hat. Beim Metall finden wir einen grossen Einzelschaden von einer halben Million, wie auch bei den Jalousien, wo Lamellenstoren mit bis zu 100'000 Fr zu Buche standen. Der Farbanstrich ist mit den absoluten Schäden nicht mehr so eindeutig aufteilbar, aber eine gewisse Aehnlichkeit zum Diagramm 4.5.f ist erkennbar.

Allgemein kann man daher folgern, dass beide Vorgehensweisen (relativer oder absoluter Schaden) für die Bestimmung einer mittleren Schadenhöhe bei Fassaden benützt werden können.

4.3.2 Dachmaterialien

In der folgenden Analyse der Dachmaterialien werden die Steil- und Flachdächer zusammen ausgewertet. Man kann aber generell sagen, dass normalerweise die Materialien Ziegel und Eternit bei Steildächern verwendet werden, während Bleche, Kunststoffe und Gläser bei beiden Dacharten vorkommen können. Die Kategorie 1 "nur Dach" wird hier nicht dargestellt, da für die einzelnen Materialien nur wenige oder gar keine Wertepaare vorhanden sind. Die vorhandenen Wertpaare passen jedoch gut in die jeweiligen Punktscharen der Streudiagramme von Figur 4.8, welche die Kategorie 4 "alle Dächer" zeigen.

In dieser Kategorie wird der Schadenanteil der Kategorie 3 "Dach+Fassade" mit dem Schlüssel 30/20/10 nach der jeweiligen Gebäudegrösse (approximiert mit dem Versicherungswert, s. Figur 4.3) aufgeteilt. In der Figur 4.8 sind die Regressionsgeraden nicht berechnet worden, sondern nur approximativ eingetragen. Die gestrichelten Geraden sollen dies andeuten. Die Streudiagramme werden wie für Figur 4.5 in der Reihenfolge a-g besprochen. Die Beziehungen der kinetischen Hagelenergie zum absoluten Schaden sind in der Figur 4.9 dargestellt und werden bei Bedarf auch in diesem Abschnitt zusammen mit dem relativen Schaden besprochen.

a) **Ziegel:** Zwei Ausreisser fallen im Diagramm auf, die anderen Punkte deuten eine schwache Zunahme des Schadens mit zunehmender Energie an. Einer der beiden Ausreisser liegt auf der rechten Flanke des Sturmes, wo wir höhere Windgeschwindigkeiten annehmen. Das andere Objekt befindet sich in Malters, wo wir - in Figur 4.6.c sichtbar - auch einen überproportionalen Farbanstrichschaden haben. Dies kann mit der Starkwind-Hypothese auf der rechten Flanke nicht erklärt werden, doch können lokal starke Böen überall im Sturm vorkommen. Bei Ziegeln sollte möglicherweise noch besser unterschieden werden zwischen Sturmwinden und Hagelschlag. Die Frage stellt sich, welche Ziegel wurden wirklich vom Hagel beschädigt und welche hat der Wind verschoben oder abgedeckt. Falls in der Police Sturmschaden vermerkt war, dann wurde dieses Objekt nicht in die Datensammlung aufgenommen. Die absoluten Schäden in Figur 4.9.a zeigen ein ähnliches Bild.

b) **Schindeln:** Mit nur zwei Wertepaaren lässt sich nichts aussagen.

c) **Blech:** Hier zeigt sich über das ganze Hagelenergie-Spektrum einen gleichmässig verteilten Schadenanteil. Die Frage ist, ob die Blechbahnen ersetzt werden, egal ob stark oder schwach geschädigt, ähnlich wie bei den Lamellenstoren. Dann können auch nur Abdeckbleche (bei

Flachdächern) betroffen sein, welche natürlich einen geringeren Schadenanteil haben als ganze Blechbahnen. Dies sollte unterschieden werden.

d) **Eternit, Schiefer:** Bei diesem Material, welches flächenhaft für die Bedachung verwendet wird, könnte eine Zunahme mit der Stärke des Hagelfalles erwartet werden. Je nachdem wieviele grosse Körner fallen, müssen Platten ausgewechselt werden. Es sind zwei Geraden eingezeichnet, die eine bedeutet Starkwindeinfluss, die andere "normale" Winde. Die vier Wertepaare mit einem Schadenanteil über 13 Promille können wiederum der Starkwindzone zugeordnet werden. Diese Dächer befinden sich in Schwarzenberg und Eigenthal, also auf der rechten Seite des Sturmes. Die absoluten Schäden (Figur 4.9.d) lassen sich ähnlich beschreiben.

e) **Kunststoff:** Gemisch von Kunststoffmaterialien, nämlich zwischen Kunststoffabdeckungen (z.B. Doppelstegplatten) und Kunststoff-Folien bei Flachdächern. Dies sollte wiederum unterschieden werden. Dazu kommt der Alterungseffekt dieser Materialien, wie schon für die Fassaden erwähnt. Es lässt sich daher noch keine Beziehung herstellen.

f) **Farbanstrich:** Die Farberneuerung findet man an den verputzten Kaminen. Es ergaben sich bis anhin nur drei Wertepaare. Daher ist keine Aussage möglich, die Wertepaare liegen jedoch bei den absoluten Schäden auf einer ansteigenden Geraden.

g) **nur Fensterglas:** Hier müsste nach gewöhnlichem Fensterglas in den Dachschrägen oder Lukarnen und den Oberlichtern von Flachdächern unterschieden werden. Diese sollten womöglich auch in dünne und dickere Scheiben unterteilt werden.

Bei den Dächern scheint es, dass die Schäden bei den flächenhaft verwendeten Materialien, wie Ziegel oder Eternit, mit zunehmender Hagelenergie auch ansteigen. Wie bei der Fassade, sollten von starken Winden betroffene Gebiete unterschiedlich abgeschätzt werden.

4.4 Hagelenergie - Anteil betroffener Policen

Um nun für ein Gebiet abschätzen zu können, wieviele Gebäude vom Hagel betroffen wurden und wie stark sie betroffen wurden, müsste eigentlich der gesamte Gebäudebestand mit den wichtigsten Merkmalen (Dachmaterial, Fassadenmaterial, aber auch Informationen über z. B. die Bebauungsdichte und -höhe) bekannt sein, um eine globale Schadenabschätzung durchführen zu können. Sobald eine Versicherung ihren Versicherungsbestand EDV-mässig und räumlich zuortbar erfasst hat, wäre man einen Schritt weiter gekommen. Soweit ist man jedoch noch nicht. Daher wurde der Versuch unternommen, den Anteil betroffener Gebäude in Relation zu der Hagelenergie zu setzen. Es sind ja nicht alle Gebäude so exponiert, dass sie überall den gleichen Schadenanteil erwarten lassen. Sie können z. B. von einem anderen Gebäude abgedeckt sein, sie können schützende Bäume vor der Wetterfassade haben, das Material kann wetterfester sein als dasjenige vom Nachbarhaus, ein Hügel oder ein Waldrand kann den Hagel abhalten oder den Wind brechen. Diese Gebäude werden dann keinen Schaden erleiden.

Damit die Datenerfassung auch hier nicht uferlos wurde, haben wir uns mit 13 Testflächen begnügt, welche so ausgewählt sind, dass sie in Siedlungsgebiete mit unterschiedlicher Hagelintensität zu liegen kommen. Ein Testgebiet umfasst dabei einen Quadratkilometer. Innerhalb einer solchen Testfläche sind von der GVL vier bis fünf Strassenzüge betreffend der Anzahl Policen und der Anzahl Policen mit Schadenmeldung untersucht worden. Für jedes Testgebiet

errechnete man den Gebäudeanteil mit Schaden in Prozent aller Gebäude. Diese Prozentzahl wird zum Mittelwert aus den Energiewerten jeder Strasse (ergibt eine Mittelung von 4 bis 5 Werten) in Beziehung gesetzt. Wir erhalten somit 13 Wertepaare.

Alle Wertepaare sind in Figur 4.11 als Streudiagramm abgebildet. Die einzelnen Punkte sind mit der Gemeinde, in der sie liegen, angeschrieben. Einzelne Gemeinden haben mehrere Wertepaare, solche sind teilweise mit Süd oder Nord etc. bezeichnet. Durch die Punkte sind zwei mögliche Regressionskurven gelegt worden. Man hat sie nicht berechnet, da im jetzigen Zeitpunkt, mit den wenigen zur Verfügung stehenden Daten, dies als nicht sinnvoll erachtet werden kann.

Für die Interpretation der beiden Kurven kann man wiederum die Zweiteilung des Sturmes in das Starkwindgebiet im Süden der Sturmachse und einer ruhigeren Zone im Zentrum des Sturmes benützen. Alle Testgebiet mit grösseren Anteilen geschädigter Gebäude liegen auf der Südseite, wie wir das schon für die Gebäude mit überproportionalen Schadenanteilen gesehen haben (s. Abschnitt 4.3 und 4.4). Weiter spielt hier sicher auch eine Rolle, ob dicht besiedeltes, städtisches Gebiet (die Häuser schützen sich gegenseitig, Wind wird gebrochen) oder ländliches Gebiete (mit offener Bebauung oder alleinstehenden Häusern) betroffen sind. Auch die Kombination Starkwind mit Schutz im dicht besiedelten Gebiet ergäbe einen niedrigeren Anteil als dieselbe Energie-Wind Konstellation im ländlichen Raum.

4.5 Hagelenergie - Gebäudeschäden vom Knutwil-Sturm

Am 2. Juni 1999 zog ein Gewittersystem, das sich im westlichen Mittelland zu organisieren begann, über den nördlichen Teil des Kantons Luzern. Von Knutwil und St.Erhard wurden Hagelschäden an Gebäuden der Gebäudeversicherung Luzern gemeldet. Es war daher naheliegend, diese Gelegenheit zu benützen, um vom Luzern-Sturm unabhängige Daten zu erhalten. Die Radarmessungen wurden wiederum vom höheren Niveau nach unten ca. 1 km über den Boden extrapoliert. Es standen keine landwirtschaftlichen Kulturen für die Aneicherung der Schadenbeziehung zur Verfügung. Korrelationen wurden daher direkt mit den Gebäudeschäden gerechnet und die erhaltenen Verschiebungsvektoren mit der Dynamik des Sturmes in Uebereinstimmung gebracht. Eine Advektion des Hagels von der extrapolierten Radarmessenebene auf den Boden wurde schliesslich aus Westen, aus einer Distanz von 2.0 km, angenommen.

Es werden nur Auswertungen mit den Fassadenmaterialien gezeigt, da kaum Dächer beschädigt wurden. Bei den Fassaden registrierte man schwache Schäden, d.h. vorwiegend Farbanstriche und Jalousien. Figur 4.10 zeigt in der gleichen Art wie Figur 4.5 die Streudiagramme der Materialien von der Kategorie 5 "alle Fassaden". Die vereinzelt Werte der Kategorie 3 (Dach und Fassade beschädigt) sind nach demselben Schlüssel, wie im Abschnitt 4.2 besprochen, aufgeteilt worden.

Beim Betrachten der Figur 4.10 ist zu beachten, dass die Skaleneinteilung der Figurenachsen unterschiedlich zur Figur 4.5 gezeichnet ist, was den hier vorkommenden maximalen Werten entspricht. Es sind auch nur von 4 Materialien Streudiagramme zu finden, da die anderen Materialien keine Schäden aufwiesen.

Generell kann man sagen, dass die Werte gut in die schon besprochenen Beziehungen von Figur 4.5 hineinpassen. Besonders beim Farbanstrich gibt es einen Ausreisser mit einem hohen Schadenanteil von etwa 40 Promille, welcher gut zur steileren Regressionsgerade der Figur 4.5.f passt. Diese Gerade repräsentiert ja die Schäden, welche durch windgetriebenen Hagel verursacht wurden. Die niedrigen Werte lassen sich entsprechend in die untere Punktewolke einpassen.

5. Vergleich mit weiteren Stürmen

In diesem Kapitel wird der aktuelle Sturm vom 21. Juli 1998 mit zwei anderen Stürmen verglichen. Der erste Vergleichssturm zog am 21. August 1992 nördlich von Luzern durch und kann von seiner Grösse und Intensität als einer der schlimmsten Hagelstürme der letzten Jahre bezeichnet werden (im folgenden Rigi-Sturm genannt, da er an der Riginordflanke grosse Waldschäden hinterliess). Dieser Sturm verursachte grosse Schäden in der Landwirtschaft und - wie oben erwähnt - in Wäldern. Eine Schadenanalyse in Bezug auf Hagel und Sturmwinde findet man in der Arbeit von Stämpfli (1996), eine Untersuchung bezüglich Dynamik bei Schmid et al. (1997).

Der zweite Sturm - der Knutwil-Sturm - streifte am 2. Juni 1999 die nördlichen Regionen vom Kanton Luzern. Er war nicht so intensiv wie derjenige von Luzern, es konnten jedoch einige Gebäudeschäden von Knutwil und St. Erhard erfasst werden, welche wir im Abschnitt 4.5 besprechen.

Die Figur 5.1.a zeigt, gleich wie in Figur 2.1 für den Luzern-Sturm, das Hagelgebiet vom Sturm am 21. August 1992 mit denselben Intensitätsintervallen. Figur 5.1.b stellt das verhagelte Gebiet vom 2. Juni 1999 dar, wobei die Intervallgrenzen anders als in den zwei stärkeren Stürmen angegeben werden, da die Energiewerte einiges niedriger sind.

Tabelle 5.1 gibt einen Ueberblick über einige ausgewählte Sturmgrössen, insbesondere der kinetischen Hagelenergie. Die total gemessene globale kinetische Hagelenergie der Stürme ist auf eine Stunde normiert, damit sie vergleichbar wird. Der Rigi-Sturm erreichte einen zweifachen Wert des Luzern-Sturmes. Die maximale an einem Ort gemessene Hagelenergie betrug beim Rigi-Sturm fast 1400 J/m^2 , diejenige vom Luzern-Sturm knapp über 1000, und der Knutwil-Sturm erreichte Spitzenwerte um 340 J/m^2 .

Weiter folgen in der Tabelle 5.1 die Hagelflächen, welche Hagelintensitäten innerhalb eines bestimmten Energie-Intervalles erreichten. Beim Rigi-Sturm beträgt die totale verhagelte Fläche fast 2000 km^2 , etwa dreimal soviel wie beim Luzern-Sturm. Da die globale Energie aber nur doppelt so gross ist, müssen die Energiegradienten beim Luzern-Sturm grösser sein, d.h. der Sturm war kompakter.

Die Zuggeschwindigkeiten der beiden grossen Stürme sind ähnlich, nämlich 11-12 m/s, während der Knutwil-Sturm mit einer Geschwindigkeit von 22 m/s durch die Landschaft zog. Eine Zuggeschwindigkeit von 12 m/s ist optimal für das Wachstum der Hagelkörner und die Verweildauer über einem potentiellen Hagelgebiet. Die Energiewerte werden daher auch grösser. Dies zeigen Analysen mit den Grossversuch IV-Daten, insbesondere der Vergleich Zuggeschwindigkeit versus maximale Hagelkorngrösse. Nur im Geschwindigkeitsbereich zwischen 5 und 12 m/s wurden Körner grösser als 20 mm gemessen. In Stürmen mit einer höheren Geschwindigkeit kann offenbar der Wachstumsprozess nicht lange genug aufrecht erhalten werden: die Hagelkörner fallen früher aus als im langsamer ziehenden Sturm. Dafür waren die Windgeschwindigkeiten in Bodennähe im Knutwil-Sturm wahrscheinlich in derselben Gröszenordnung wie die Zuggeschwindigkeit (keine direkte Messungen verfügbar), da der Sturm ein "Bowecho" (Bogenecho), ein nach vorne gekrümmtes intensives Niederschlagsgebiet (sichtbar im Radarbild) zu formen begann, was auf sehr starke Winde schliessen lässt, welche die Niederschlagsgebiete in der Mitte schneller als an den Flanken vorwärtstreiben lassen. Starke Sturmböen sind zu erwarten, daher können auch kleinere Körner windgetrieben noch Schaden anrichten.

Der Unterschied in der maximalen Korngrösse lässt sich auch von der maximal erreichten Radarreflektivität abschätzen. 64 dBZ lassen Körner von etwa 20 bis 30 mm erwarten, der Knutwil-Sturm könnte also durchaus einige 30 mm Körner gehabt haben; die grosse Mehrheit

der Körner erreichte aber wahrscheinlich nur Durchmesser bis 20 mm. 68 dBZ lassen Körner zwischen 30 und 40 mm erwarten, und bei 70 dBZ sind 40 mm Körner in den Hagelkornspektren zu finden. Die Korngrößen aus den Spektren lassen auf etwas grössere Körner als aus den maximalen Radarreflektivitäten schliessen (Figur 3.2.a).

Tabelle 5.1 Vergleich einiger Sturmgrößen, insbesondere der kinetischen Hagelenergie, von drei Stürmen unterschiedlicher Intensität im Kanton Luzern.

Sturm	Rigi-Sturm	Luzern-Sturm	Knutwil-Sturm
Datum	21. August 1992	21. Juli 1998	2. Juni 1999
Zeit Radarmessung (UTC)	1508-1718	1306-1426	1557-1637
totale Energie (MJ)	370'000	108'000	40'000
totale Energie (MJ/h)	170'000	81'000	60'000
Flächen in km ² mit J/m ² :			
1 - 200	1306	374	451
200 - 400	370	130	32
400 - 600	147	37	-
600 - 800	64	21	-
800 - 1000	34	10	-
1000 -	18	1	-
totale Hagelfläche in km ²	1939	537	483
max. kin. Energie (J/m ²)	1384	1035	335
max. Korngrösse (Fig. 3.2.a)	45	40	30
max. Radarreflektivität	71.2	67.7	64.5
daraus max. Korngrösse	35-40	30-35	25-30
Zuggeschwindigkeit (m/s)	12	11	22
max. Windstärke (m/s) vom ANETZ	48.3	29.2	kein Angabe

6. Schlussfolgerungen

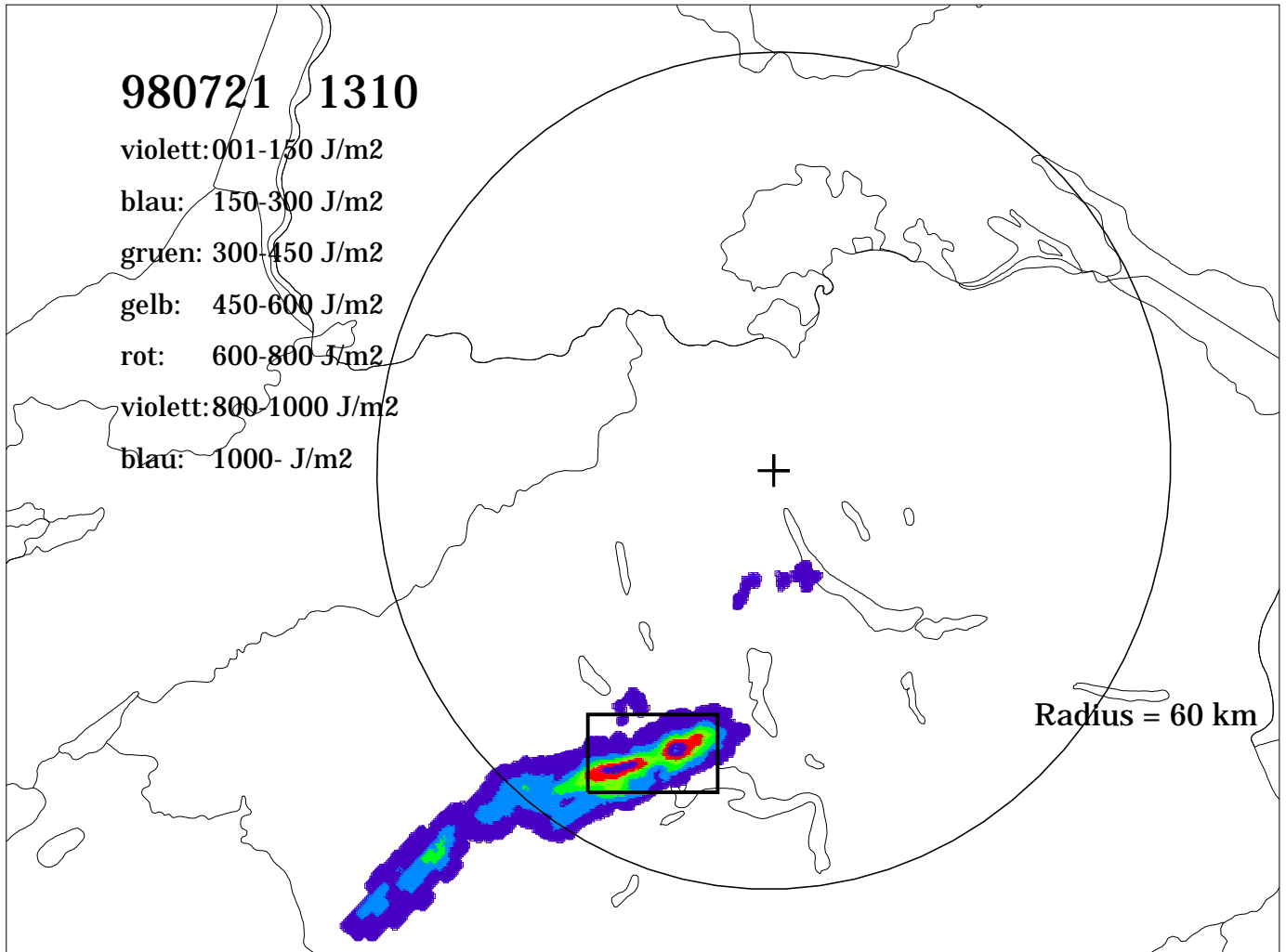
- 1) Generell scheint es möglich, mit der aus der Radarreflektivität berechneten vertikalen kinetischen Hagelenergie auf Schäden an Gebäuden zu schliessen. Da die Dauer des Hagelschlages und die maximal erreichte Radarreflektivität (ein Mass für die maximale Hagelkorngrösse) mit der totalen kinetischen Hagelenergie hoch korrelieren, kann die vertikale kinetische Hagelenergie alleine für die Abschätzung eines Schadens benützt werden.
- 2) Es ist notwendig, die Schäden an den Gebäuden nach Materialien zu unterteilen. Eine Unterscheidung nach Gebäudewert (entspricht ungefähr auch der Gebäudegrösse) und dem Gebäudeteil (Dach oder Fassade) reicht nicht aus. Die Materialien müssen nach Dach und Fassade unterschieden werden. Dächer sind mehr exponiert und je nach Dachschräge und Einfallswinkel des Hagels fallen die Hagelkörner mehr oder weniger senkrecht auf die Fläche. Dabei sollte man, sofern genügend Daten vorhanden sind, nach Schrägdach und Flachdach (andere Materialien) unterteilen.
- 3) Flächendeckende Materialien wie Putz, Eternit und Farbanstrich geben die besten Beziehungen zwischen der kinetischen Hagelenergie und dem Schaden. Dabei spielt es keine Rolle, ob der relative Schaden (Anteil an der Versicherungssumme) oder der absolute Schaden (in Franken) verwendet wird.
- 4) Für die Berechnung einer guten Beziehung müssen "Ausreisser" gesondert behandelt werden. Es zeigte sich, dass diese meist einen überproportionalen Schadenanteil erhalten. Dies lässt sich in allen Fällen auf stärkere Windböen zurückführen (2-3 mal höhere Windgeschwindigkeiten als der mittlere 10 min Wind), die den Hagel mit höherer Wucht auf das Dach oder die Fassade aufschlagen lassen. Dabei zeigt sich in mehreren Fällen, dass dann auch grössere Lamellenstorschäden vorhanden sind. Niedrigere Werte können durch ein schützendes Haus oder Bäume erreicht werden. Der Einfallswinkel des Hagels ist dann relativ steil und wird, insbesondere bei Fassaden, weniger grosse Schäden anrichten.
- 5) Die Unterscheidung in Sturm-, Hagel- und Folgeschäden (wie Wasserschäden durch nachfolgende intensive Regenfälle) ist notwendig, damit man die "reinen" Hagelschäden erhält. Dies ist in der Praxis aber kaum immer zu bewerkstelligen. Ziegel können auch vom Wind verrückt werden oder fallen vom Dach; sie müssen dann wieder gerichtet oder ersetzt werden. Durch die Löcher kann der Regen eindringen und die darunterliegenden Räume überfluten. Manchmal ist dies aus den Schadenprotokollen dank entsprechenden Bemerkungen ersichtlich. Dann wurden die Objekte nicht in die Datensammlung aufgenommen.
- 6) In dieser Vorstudie wurde nur das Material (Dach oder Fassade) eines Objektes erfasst, welches zur Beschädigung im Vergleich zu den anderen betroffenen Materialien die grösste Hagelenergie benötigt, d.h. am unempfindlichsten ist. Dieses Material wurde dem totalen Schadenanteil, der jedoch aus verschiedenen "Schäden" bestehen kann, gegenübergestellt. In einer erweiterten Datensammlung sollten die Reparaturkosten nach allen betroffenen Materialien aufgeschlüsselt werden. Damit verhindert man, dass der Schaden des hauptsächlich betroffenen Materials durch zusätzliche Materialien beeinflusst ist. Die Schadenbeziehungen sollten sich dadurch verbessern. Im Erhebungsblatt müssten daher alle Materialien angekreuzt werden und der entsprechende Reparaturwert dazugesetzt werden. Aus den Schadenprotokollen kann dies in den meisten Fällen herausgelesen werden. Die Datenerfassung wird dadurch aufwendiger, ist aber notwendig.

- 7) Bei nicht flächenhaften Materialien, wie z.B. Blechabdeckungen und Kunststoffelementen, sollte angegeben werden, um was es sich handelt. Auch bei den Lamellenstoren wäre das Wissen über die Anzahl betroffener Storen von Interesse. Da solche Elemente eher zufällig getroffen werden, je nach Anzahl grosser Körner oder je nach Anzahl heruntergelassener Storen, muss hier ein Faktor bestimmt werden, mit dem man die Schadenwerte der flächenhaften Materialien allenfalls multipliziert, um einen kombinierten mittleren Schadenanteil zu erhalten.
- 8) Die bestehende Datensammlung muss natürlich noch erweitert werden. Für diese Pilotstudie war eine umfangreiche Datensammlung nicht möglich, da man aus dem Schadenprotokoll die Werte herausuchen und die entsprechenden Objekte lokalisieren musste. Dies ist ein grösserer Aufwand, den man nicht unterschätzen darf. Die ersten Hinweise auf mögliche Beziehungen zwischen Radarmessung und Gebäudeschaden lassen es aber gerechtfertigt erscheinen, einen weiteren Aufwand zu wagen.
- 9) Zusätzlich zum Luzern-Sturm ist zu empfehlen, dass man einen geeigneten zweiten Sturm aus der Vergangenheit auswählt, der sich in idealer Entfernung zum Radar befand (keine Abschattung und Abschwächung, daher keine Extrapolation der Radarwerte, geringer Abstand zum Radarstandort = gute Auflösung der kinetischen Hagelenergie) und der Schäden in grösseren Siedlungen im Schweizerischen Mittelland verursachte. Von diesen Schäden müssten die Schadenprotokolle in den Archiven der entsprechenden Gebäudeversicherungen zu finden sein. An diesem Sturm wäre es mit Hilfe der Doppler-Information (Messung der Bewegung der Niederschlagspartikel) möglich, eine Abschätzung des Anteils der Starkwindzonen am ganzen Hagelgebiet durchzuführen. Der Sturm muss aber so ausgewählt werden, dass er sich auf das Radar zu bewegt, damit die wahre Geschwindigkeit verfügbar ist. Aus dem am Institut für Atmosphärenphysik vorhandenen Hagelsturmdatensatz der Jahre 1992-1999 sollte es möglich sein, einen geeigneten Sturm zu finden.
- 10) Generell ist zum Schluss zu bemerken, dass eine Ueberprüfung an einem unabhängigen, ähnlich starken Sturm sinnvoll ist, denn erst dann hat man die Gewähr, ob die erhaltenen Beziehungen zu gebrauchen oder eben nicht zu gebrauchen sind.

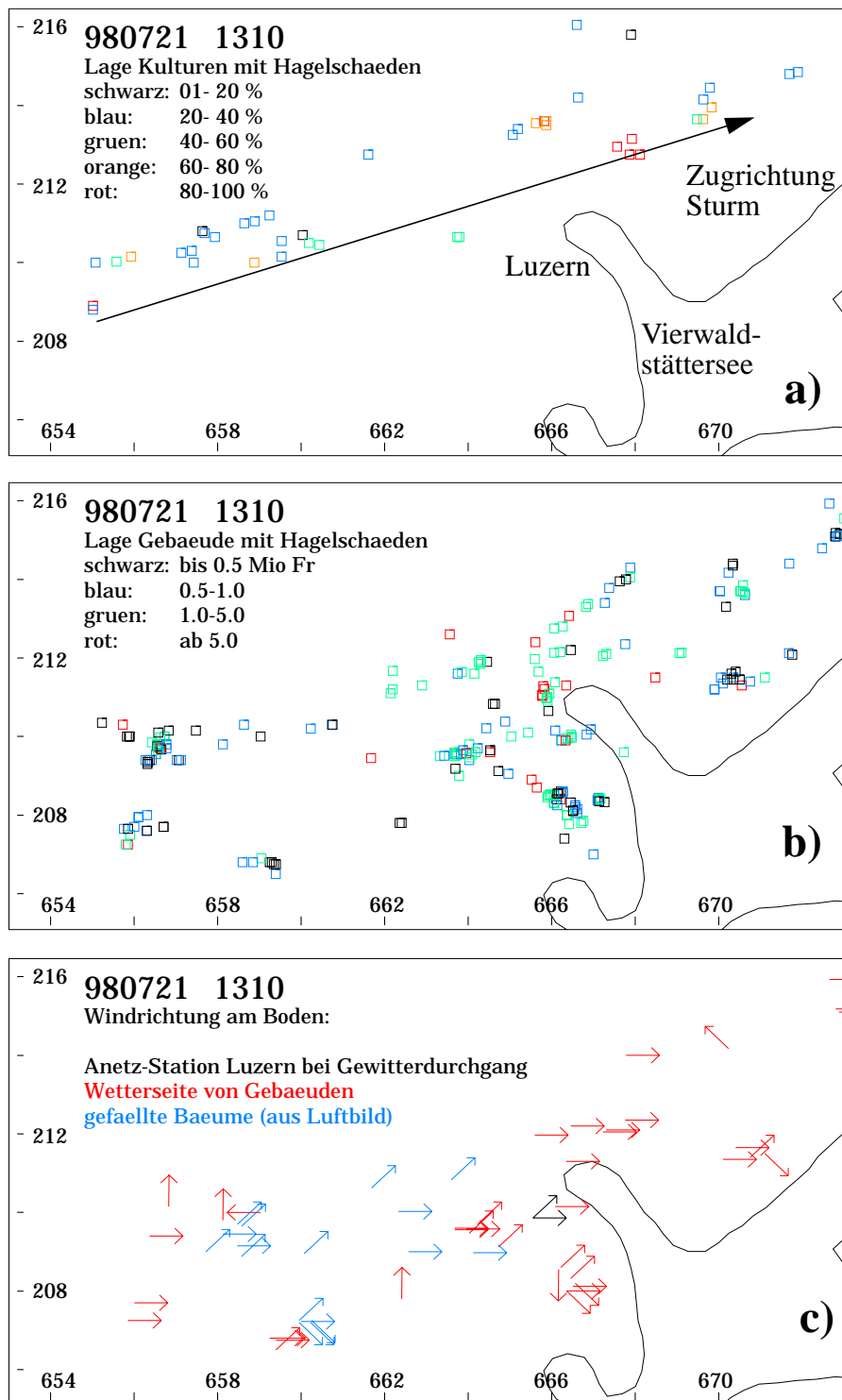
Referenzen

- Egli, T., 1996: Maximale Windspitzen und Niederschlagsintensitäten im Umfeld von starken Hagelgewittern anhand von ANETZ-Daten. Semesterarbeit, Institut für Atmosphärenphysik ETH-Zürich, 31pp.
- Carlton, R.B., B.M. Kachmann and L. Wojtiw, 1998: The Edmonton tornado and hailstorm: a decade of research. CMOS (Canadian Meteorological and Oceanographic Society) Bulletin, Special Issue, 26, 56pp.
- Federer, B., A. Waldvogel, W. Schmid, H.H. Schiesser, F. Hampel, M. Schweingruber, W. Stahel, J. Bader, J.F. Mezeix, N. Doras, G. d'Aubigny, G. DerMegreditchian and D. Vento, 1986: Main results of Grossversuch IV. J. Climate Appl. Meteorol., 25, 917-957.
- Flüeler, P. und F. Rupp, 1987: Zum Hagelschlagverhalten von Elementen der Gebäudehülle, insbesondere von solchen aus Kunststoffen. EMPA Forschungs- und Arbeitsberichte, Nr. 114/3, 37pp.
- GVL, 1998: Gebäudeversicherung des Kantons Luzern, Geschäftsbericht 1998, 19-22.
- Huntrieser, H., H.H. Schiesser, W. Schmid and S. Willemse, 1994: The evolution of the "mesoscale convective system" over Switzerland. In: S. Haase-Straub, D. Heimann, T. Hauff and R. Smith, editors: The squall line of 21 July 1992 in Switzerland and southern Germany - a documentation. DLR Research Report 94-18, 39-66.
- Kurz, M., 1985: Zum Münchner Hagelunwetter vom 12.07.1984. Meteor.Rdsch., 38,129-144.
- NHRC (Natural Hazards Research Centre), 1999: The April 1999 Sydney hailstorm. NHQ (Natural Hazards Quarterly), 5, No.2, 4pp.
- Partner Re, 1999: Sydney hailstorm, April 14, 1999. Partner Re Services Zurich, 4pp.
- Schiesser, H.H., 1988: Fernerkundung von Hagelschäden mittels Wetterradar - untersucht an Ackerkulturen. Remote Sensing Series, 14, Geographisches Institut der Universität Zürich, 199pp.
- Schiesser, H.H., 1990: Hailfall: the relationship between radar measurements and crop damage. Atmospheric Research, 25, 559-582.
- Schiesser, H.H., A. Waldvogel, W. Schmid und S. Willemse, 1997: Klimatologie der Stürme und Sturmsysteme anhand von Radar- und Schadendaten, vdf Hochschulverlag, Zürich, 132pp.
- Schmid, W. and A. Waldvogel, 1986: Radar hail profiles in Switzerland. J.of Climate and Appl.Meteor., 25, 1002-1011.
- Schmid, W., H.H. Schiesser and A. Waldvogel, 1992: The kinetic energy of hailfalls. Part IV: Patterns of hailpad and radar data. J.Appl.Meteor., 31,1165-1178.
- Schmid, W., H.H. Schiesser and B. Bauer-Messmer, 1997: Supercell storms in Switzerland: case studies and implications for nowcasting of severe winds with Doppler radar. Meteorol.Appl., 4, 49-67.
- Smith, P. and A. Waldvogel, 1989: On the determination of maximum hailstone size from hailpad observations. J.Appl.Meteor., 28, 71-76.
- Stämpfli, S., 1996: Analyse von Sturmschäden anhand von Luftbildern. Diplomarbeit, Geographisches Institut der Universität Zürich, 45pp, Anhang mit Luftbildern, Tabellen und Karten.
- Waldvogel, A., W. Schmid and B. Federer, 1978a: The kinetic energy of hailfalls. Part I: Hailstone spectra. J.Appl.Meteor., 17, 515-520.
- Waldvogel, A., B. Federer, W. Schmid and J.F. Mezeix, 1978b: The kinetic energy of hailfall, Part II. Radar and hailpads. J. Appl. Meteorol., 17, 1680-1693.

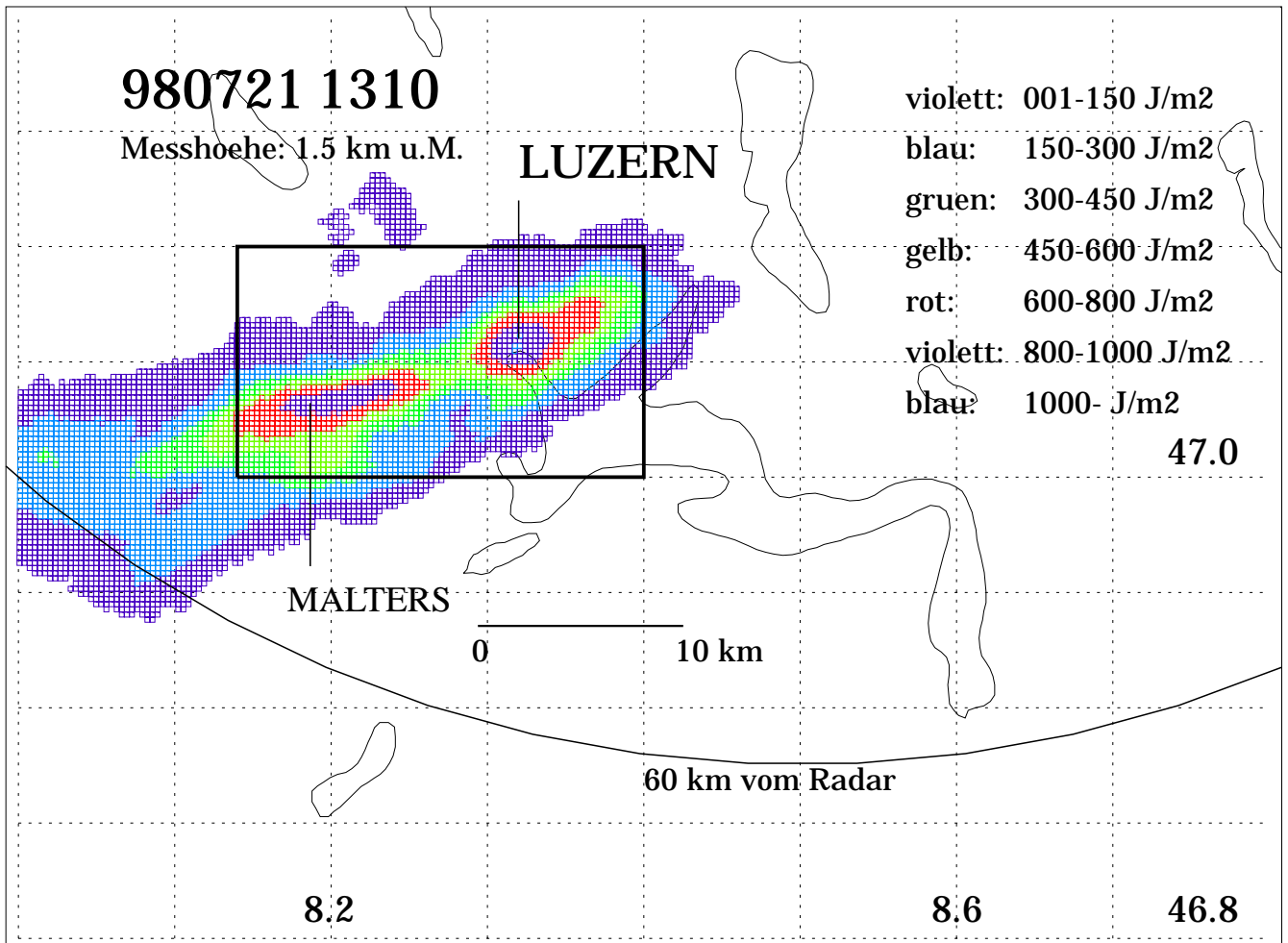
Figuren und Anhang



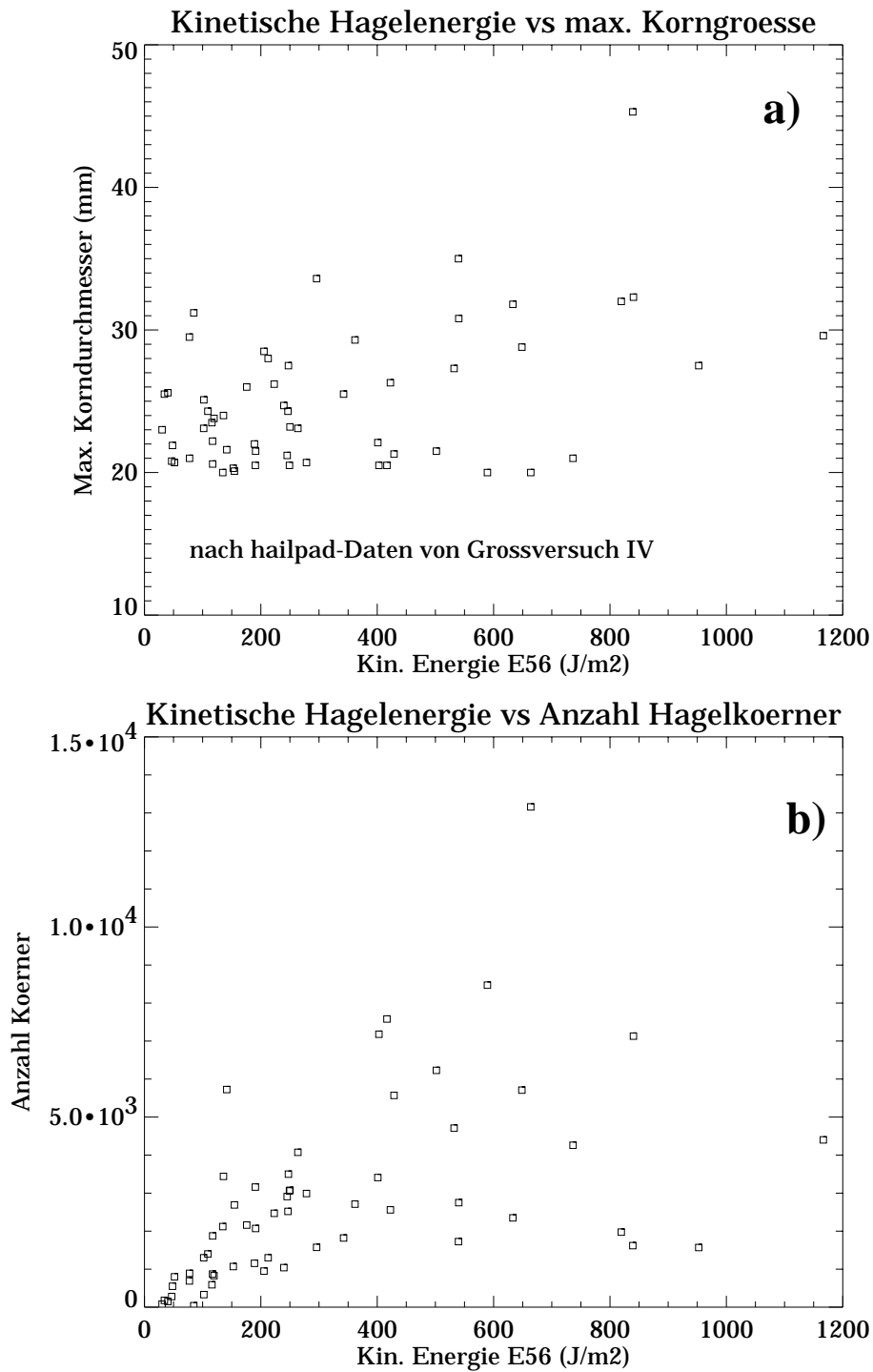
Figur 2.1 Ueberblick über die vom Hagelsturm vom 21. Juli 1998 betroffenen Gebiete. Der Radarstandort an der ETH-Hönggerberg in Zürich ist mit einem Kreuz bezeichnet, der Kreis begrenzt ein Beobachtungsgebiet von 60 km Radius. Das Rechteck markiert das engere Untersuchungsgebiet dieser Studie (Figur 2.2). Die kinetische Hagelenergie ist dargestellt, die Intensitätsintervalle (Joule/m²) sind in der Legende zu finden. 1310 bedeutet die Zellennummer, welche identisch ist mit dem Zeitpunkt (UTC) der Radarerfassung im Südwesten.



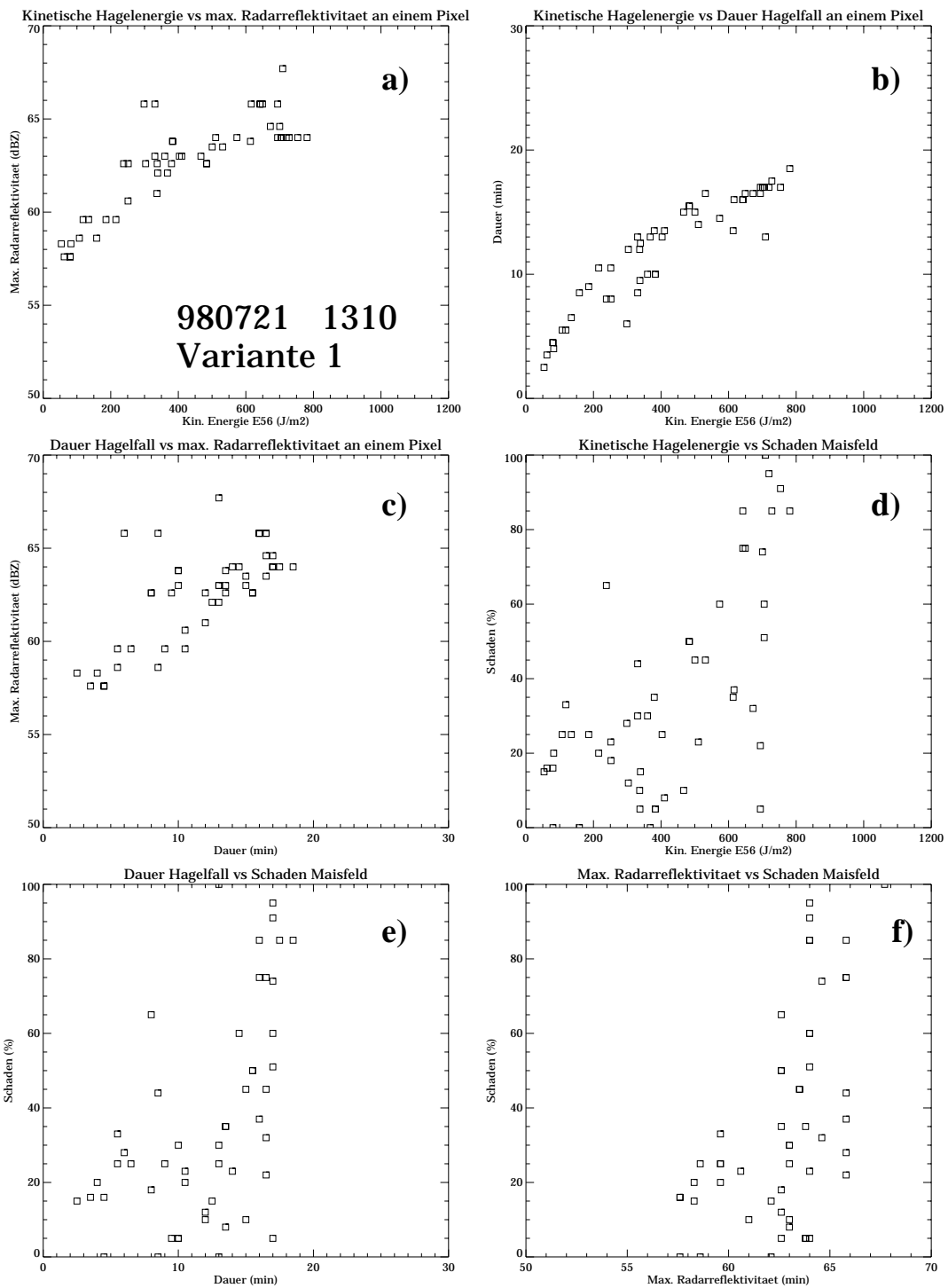
Figur 2.2 a) Lage der erfassten Felder nach Schadenklassen aufgetragen, b) Lage der erfassten Gebäude unterteilt nach dem Versicherungswert und c) Windinformationen, erhalten aus Angaben in den Schadenprotokollen der Gebäudeversicherung, aus Luftbildern und von der ANETZ-Station Luzern.



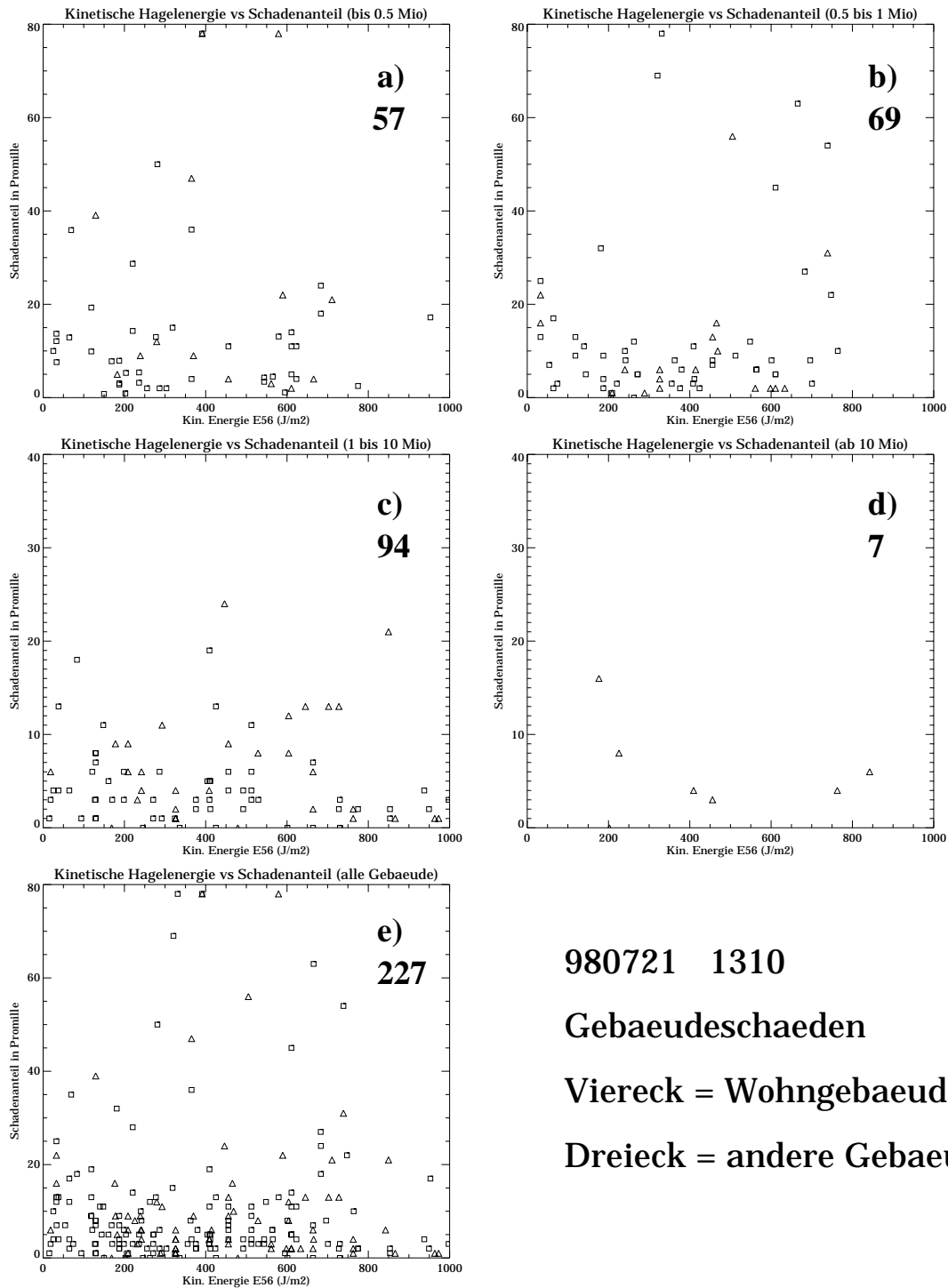
Figur 3.1 Die räumliche Verteilung der kinetische Hagelenergie im Sturmgebiet. Das engere Untersuchungsgebiet ist mit einem Rechteck markiert und entspricht dem Gebiet der Figuren 2.2.a-c. 1310 bedeutet die Zellennummer, welche der Zeitpunkt (UTC) des Beginns der Radarerfassung der Zelle bedeutet. Zwei Intensitätszentren (Malters und Luzern) sind gut unterscheidbar.



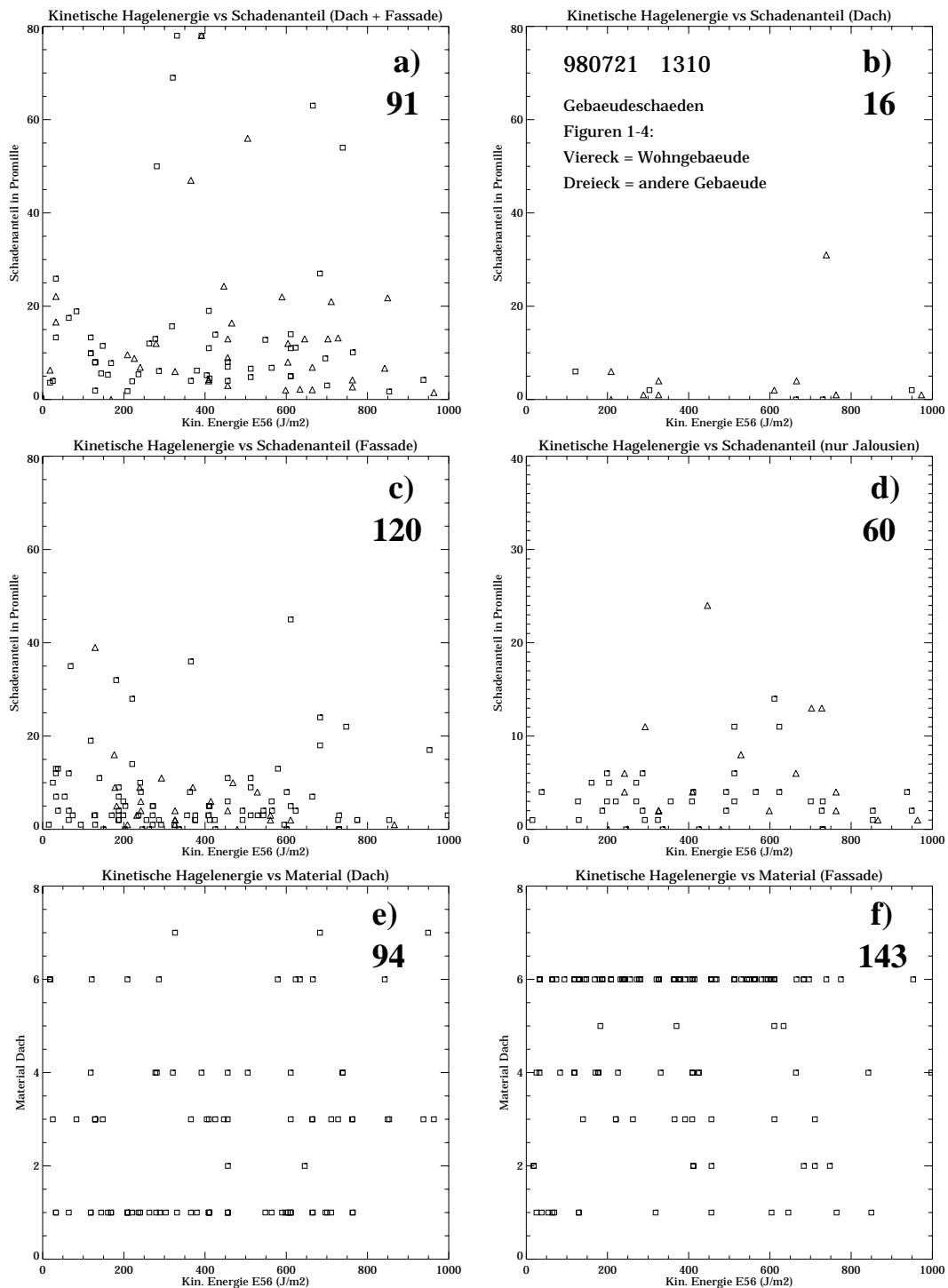
Figur 3.2 Streudiagramme kinetische Hagelenergie versus maximale Hagelkorngrösse (a), respektive versus Anzahl Hagelkörner pro m². Die Daten wurden von solchen Hagelkornspektren verwendet, welche eine Korngrösse von mindestens 20 mm aufweisen. Die Daten stammen vom Grossversuch IV (Federer et al. 1986).



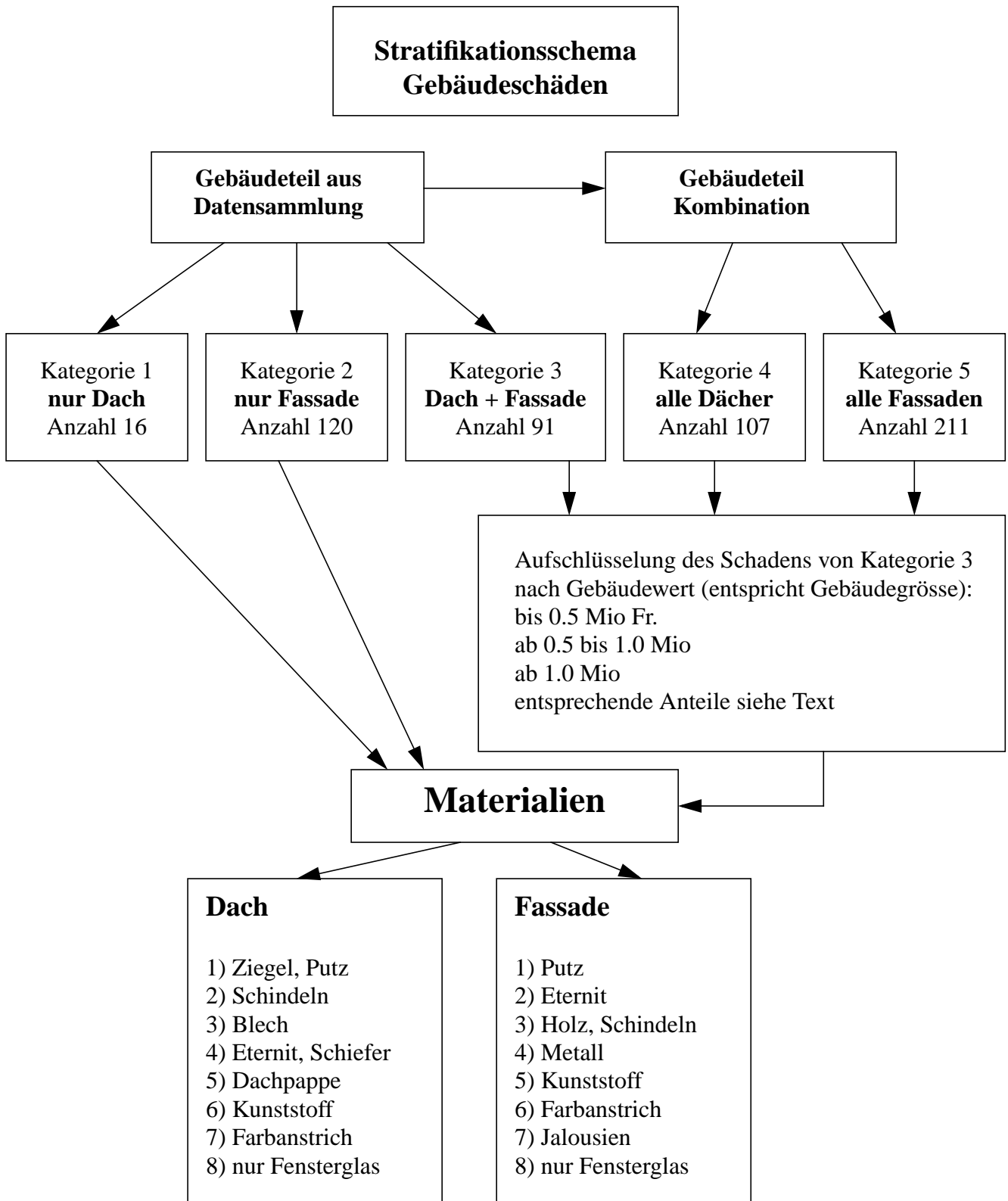
Figur 3.3 Streudiagramme von der besten Verschiebung (Variante 1) Radarwerte versus Schäden an Maiskulturen. Die Energie, Dauer und max. Reflektivität untereinander und in Beziehung zu den Schäden sind dargestellt.



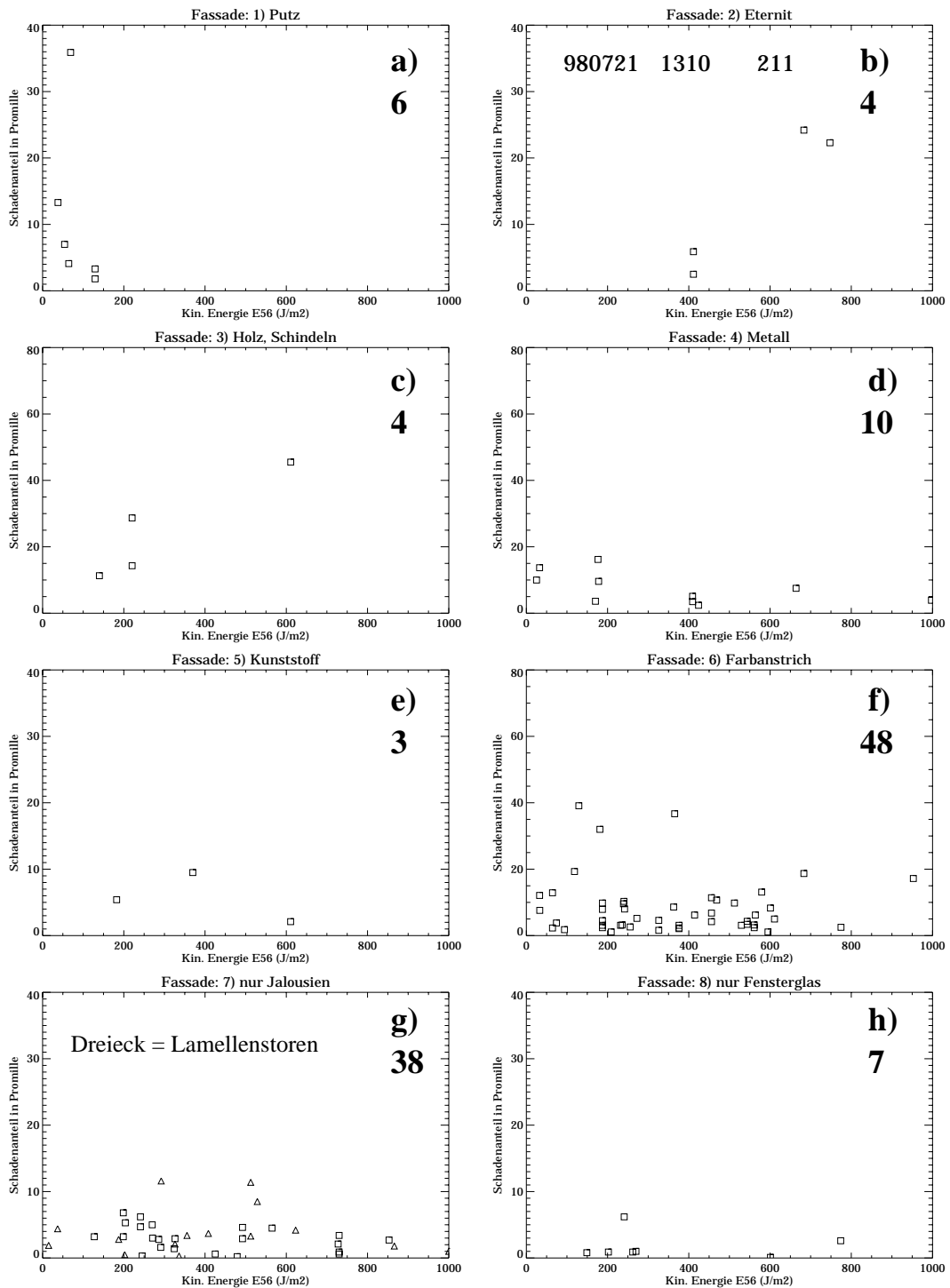
Figur 4.1 Streudiagramme kinetische Hagelenergie versus relativer Schaden in Promille des Versicherungswertes, stratifiziert nach Versicherungswert, welcher in der Titelzeile in Klammern steht (a-d) und für alle erfassten Gebäude (e). Die Nummer gibt die Anzahl Objekte in jeder Kategorie an.



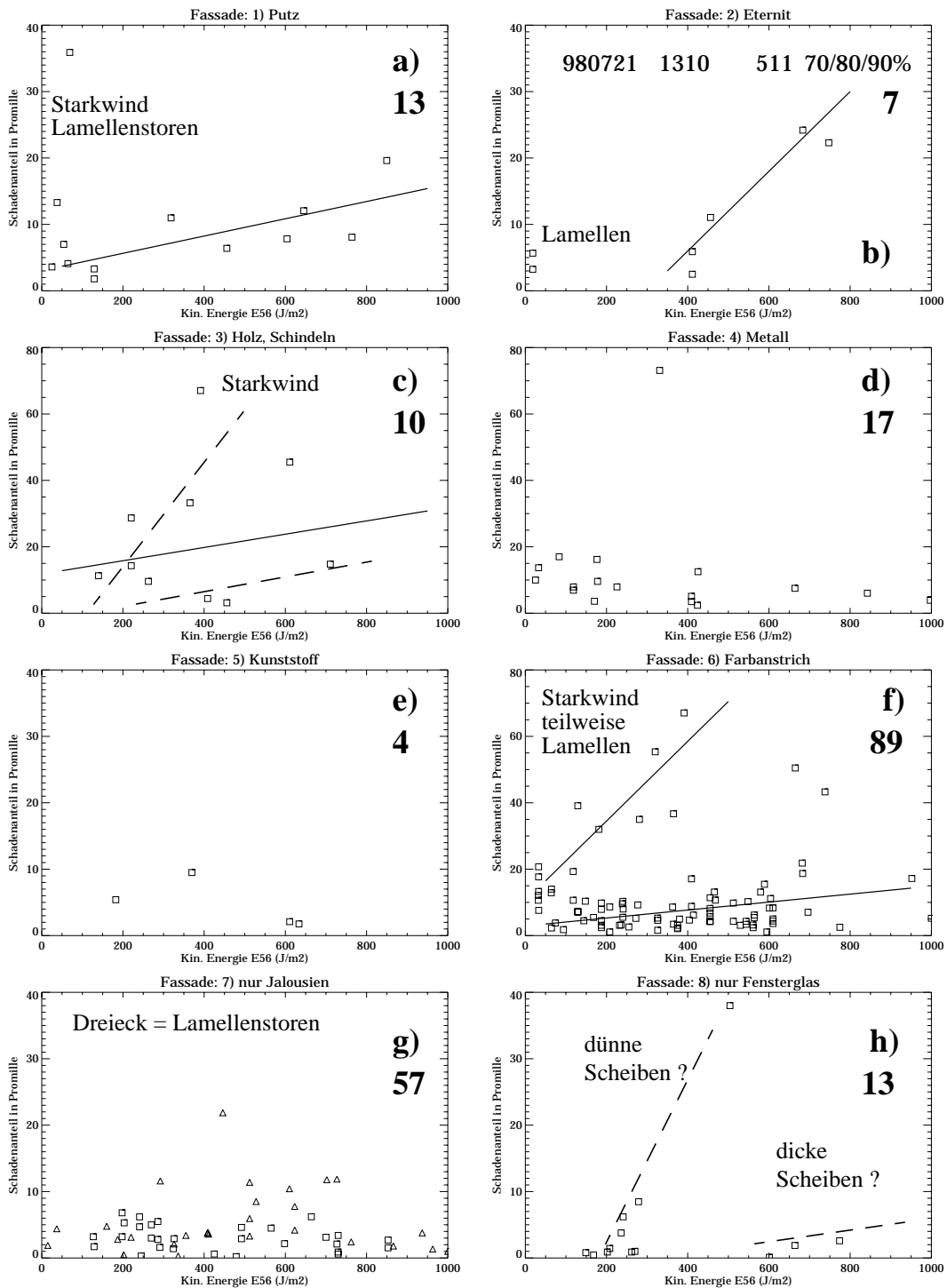
Figur 4.2 Streudiagramme kinetische Hagelenergie versus relativer Schaden in Promille des Versicherungswertes, stratifiziert nach den betroffenen Gebäudeteilen (a-d), respektive die Energie versus hauptsächlich betroffener Materialien für die Dächer (e) und für die Fassaden (f). Die Nummer bedeutet die Anzahl Objekte.



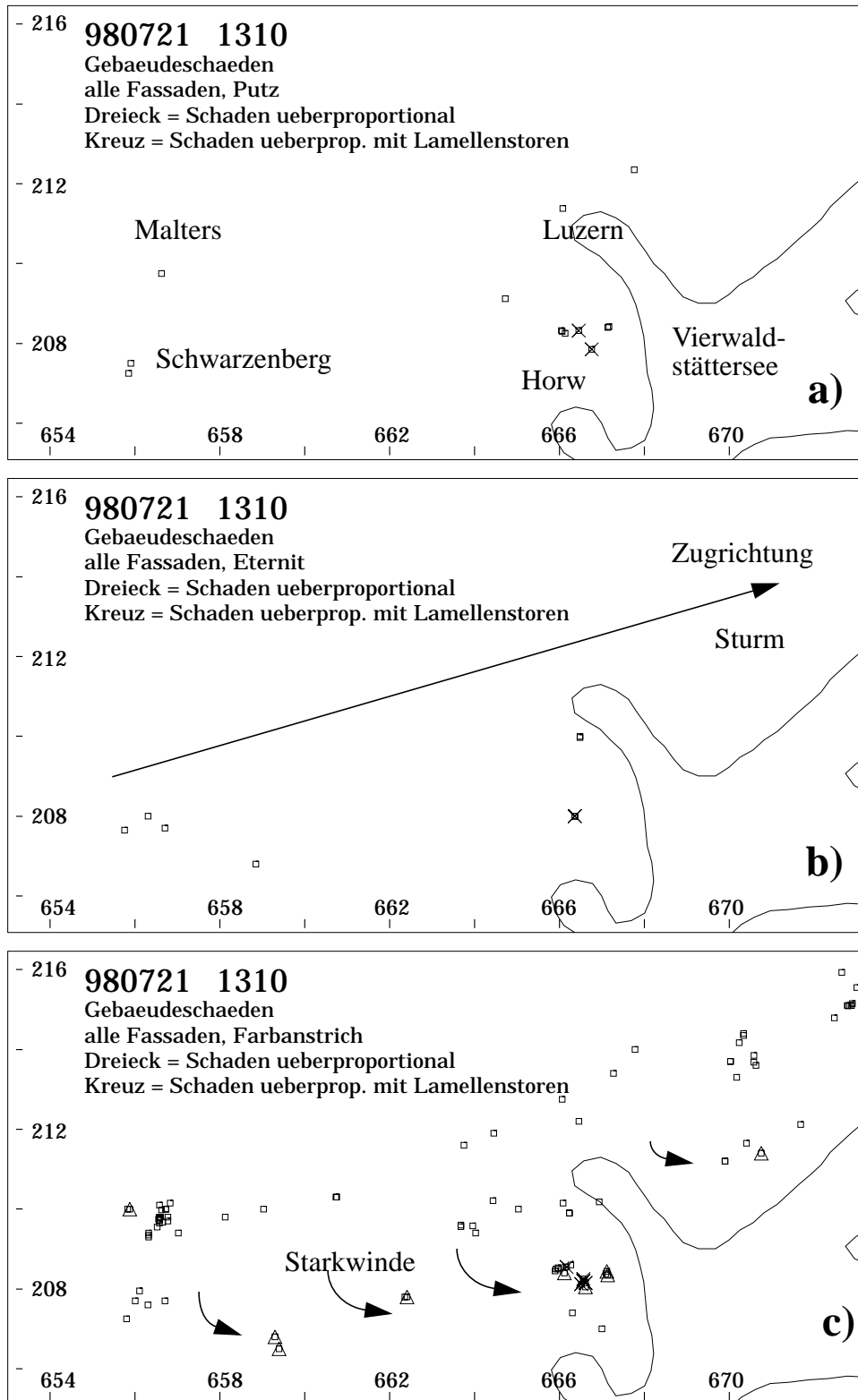
Figur 4.3 Stratifikationsschema Gebäudeschäden



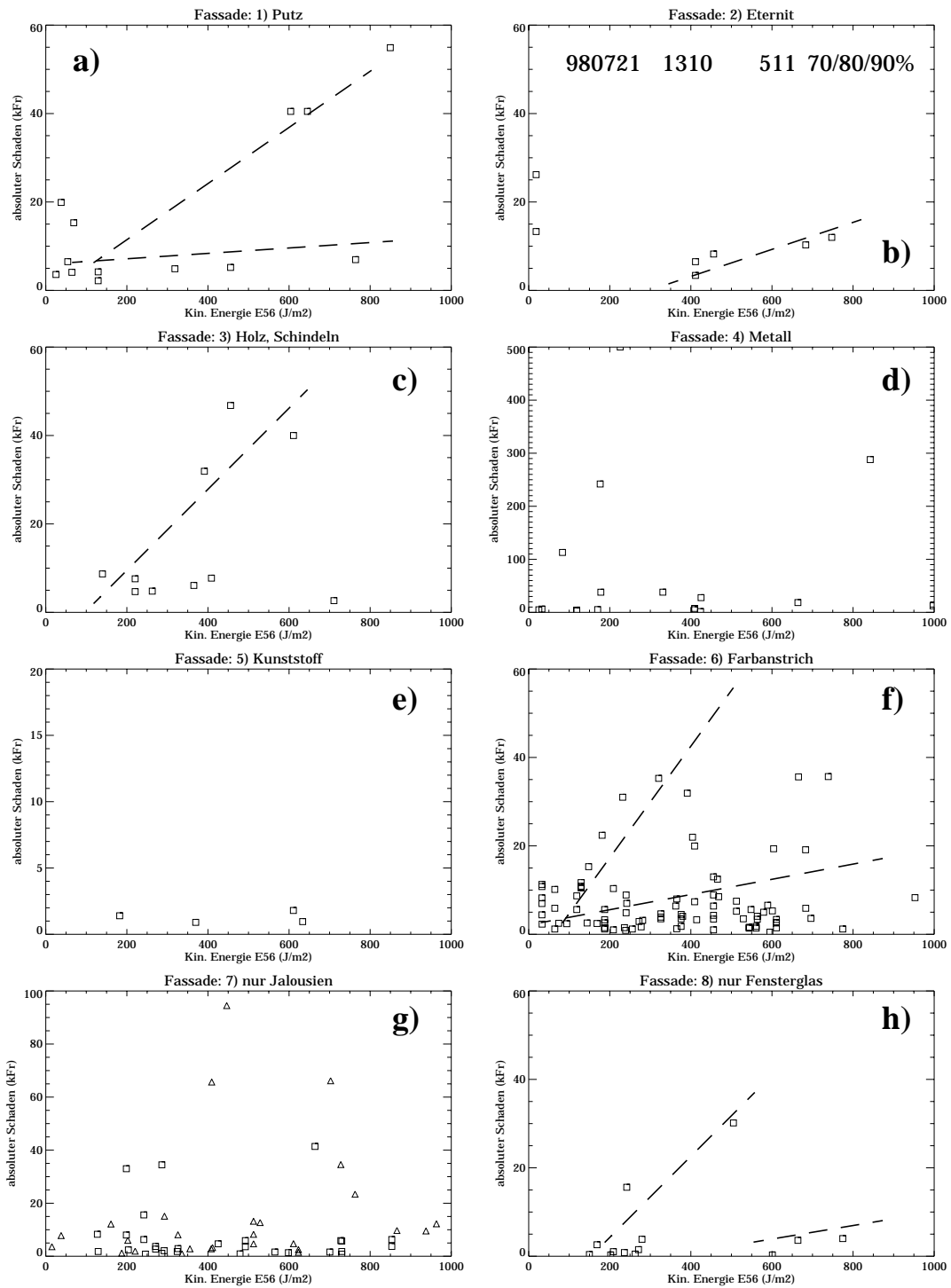
Figur 4.4 Streudiagramme Hagelenergie versus Schadenanteil für Materialien der Kategorie 2 "nur Fassade". Die Zeile in Figur b) bedeutet: Datum, Zellennummer, Stratifikationscode (2="nur Fassaden", 1=alle Gebäude, 1=beide Bebauungsarten). Die Nummern geben die Anzahl Objekte an.



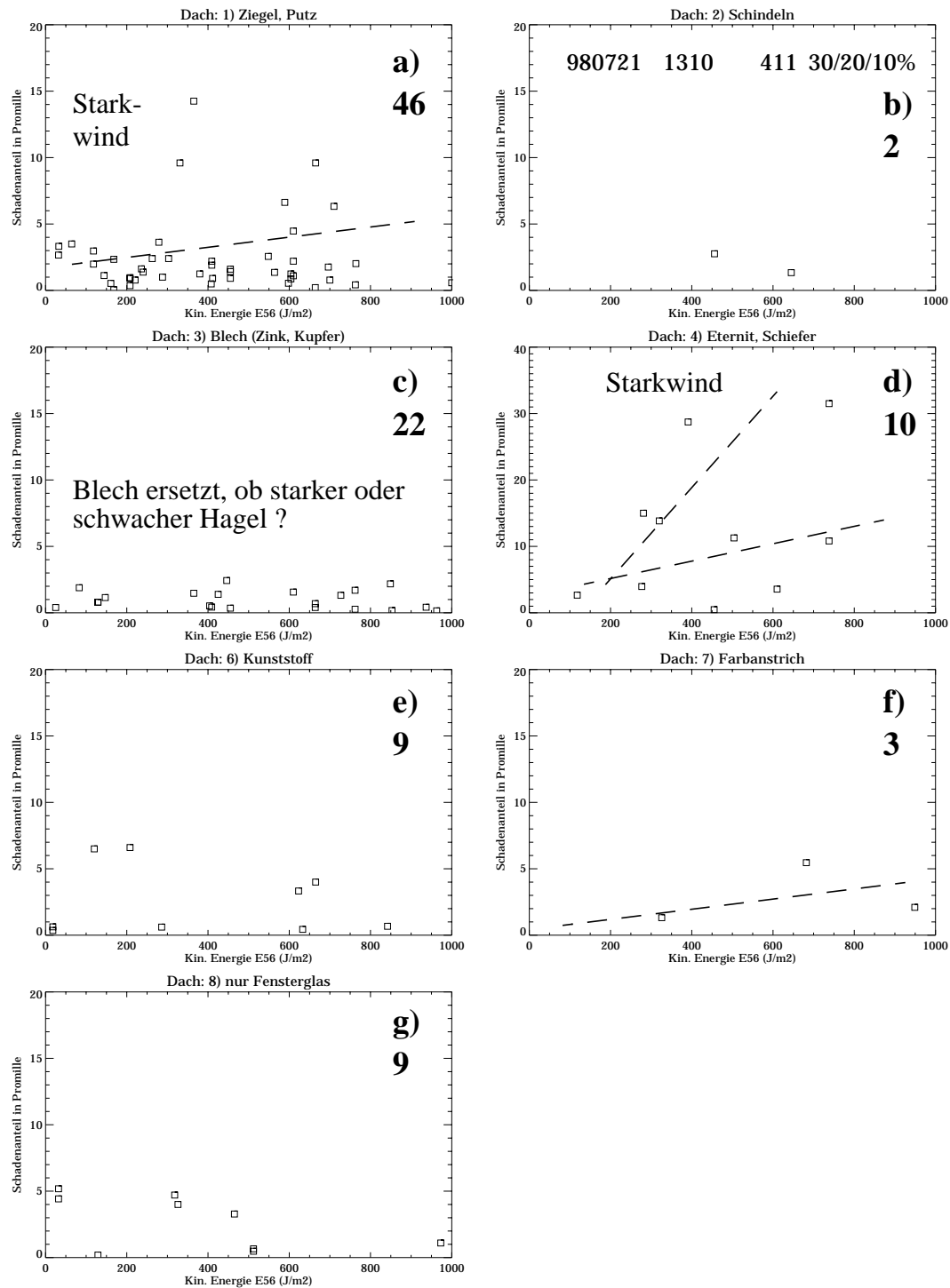
Figur 4.5 Streudiagramme Hagelenergie vs Schadenanteil für Materialien der Kategorie 5 "alle Fassaden". Regressionsgeraden sind eingetragen. Berechnete sind ausgezogen, mögliche sind gestrichelt angedeutet. Die Zeile in Figur b) bedeutet: Datum, Zellennummer, Stratifikationscode (5="alle Fassaden", 1=alle Gebäude, 1=beide Bebauungsarten,) und die Prozentzahlen für die Aufteilung Dach : Fassade (s. Text).



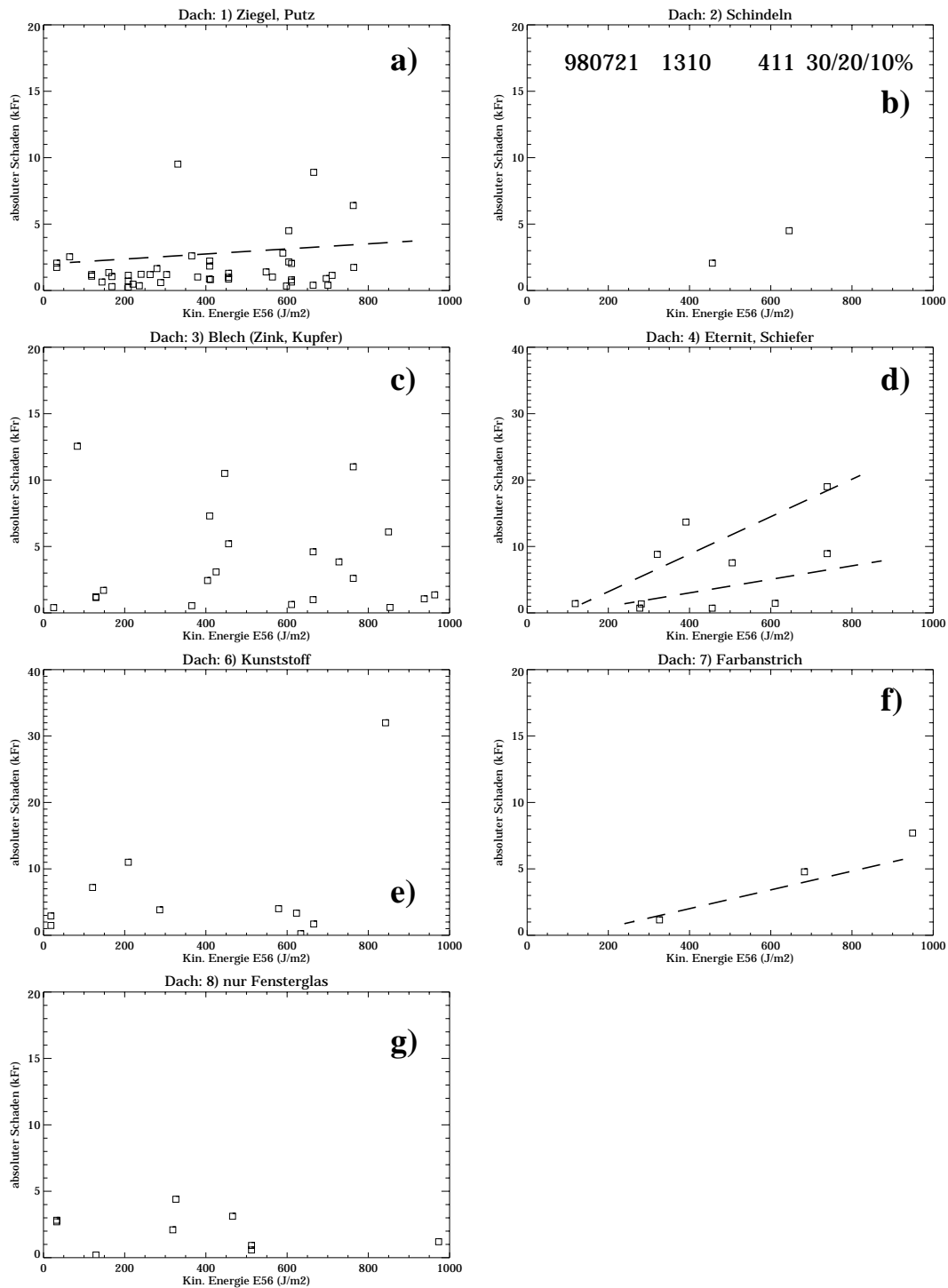
Figur 4.6 Lage der Gebäude in Bezug zur Sturmbahn mit Schäden an einem bestimmten Fassadenmaterial: a) für Putz, b) für Eternit, c) für Farbanstrich. Das Symbol Dreieck deutet die Standorte von Gebäuden mit überproportionalem Schadenanteil an, das Symbol Kreuz bedeutet überproportionaler Schaden mit Lamellenstoren.



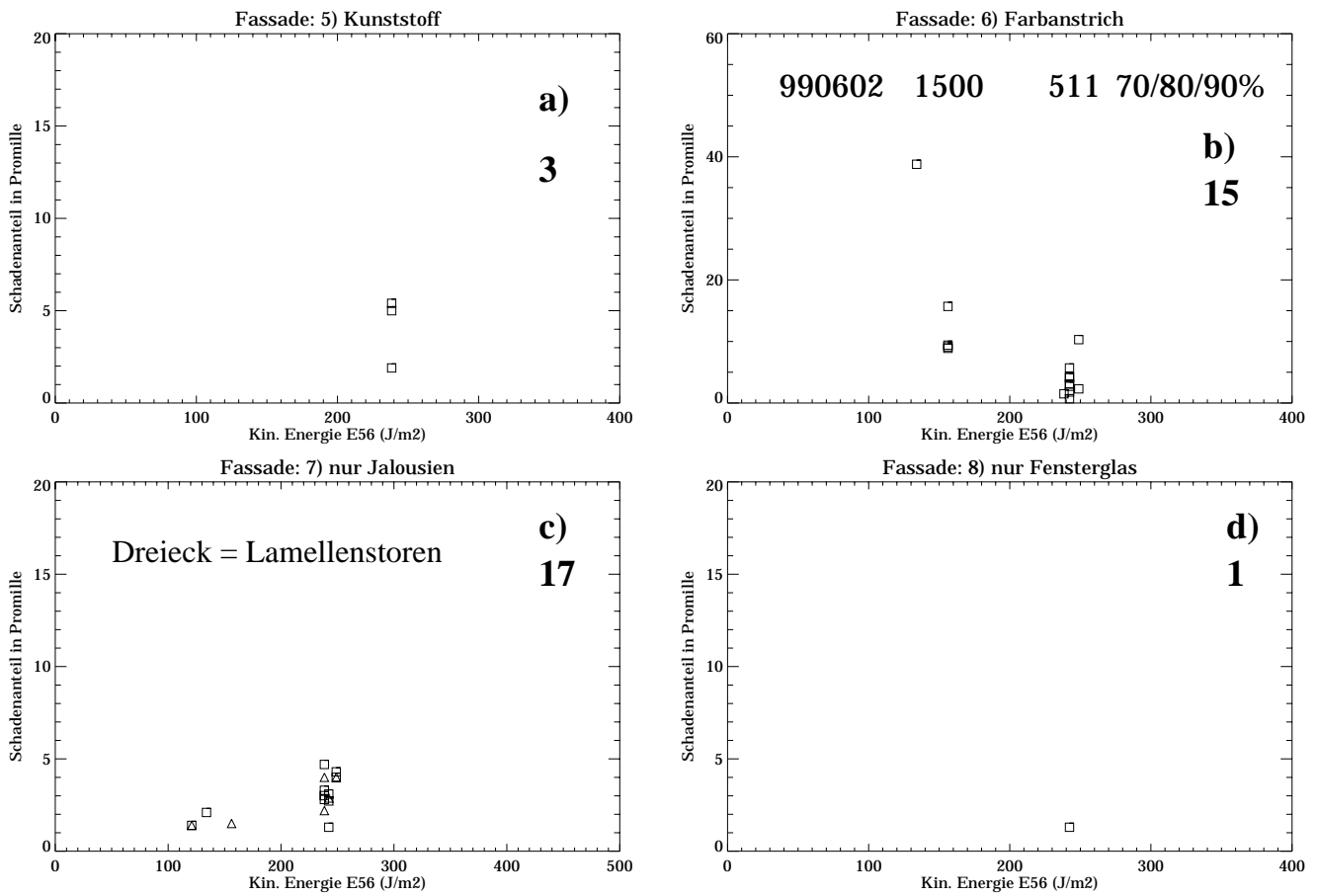
Figur 4.7 Dasselbe wie in Figur 4.5, aber für den absoluten Schaden. Der Schaden ist in 1000 Fr. (kFr) angegeben. Mögliche Regressionsgeraden sind gestrichelt angedeutet.



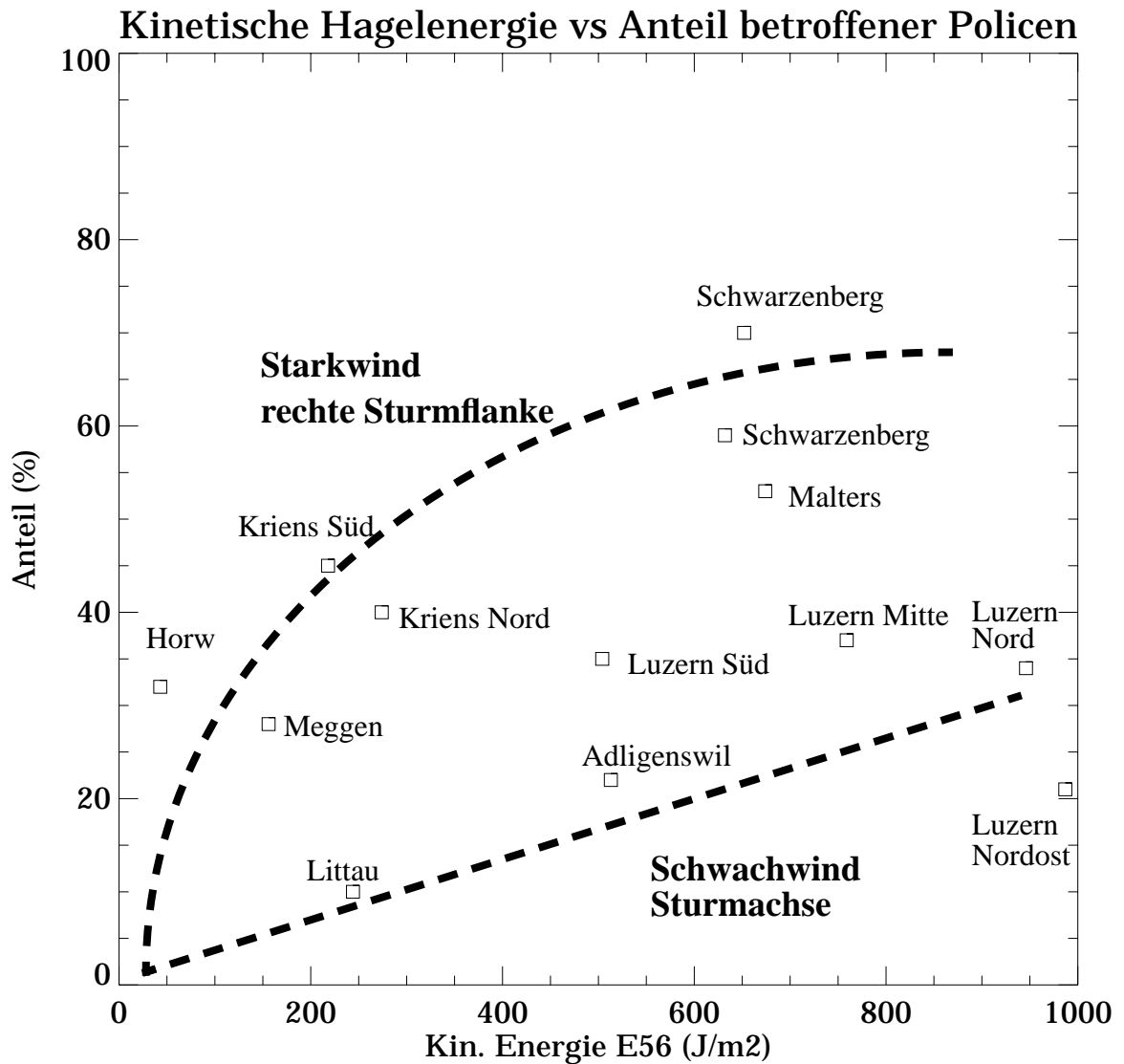
Figur 4.8 Streudiagramm Hagelenergie versus Schadenanteil für Materialien der Kategorie 4 “alle Dächer”. Mögliche Regressionsgeraden (nicht berechnet) sind mit einer gestrichelten Geraden angedeutet. Die Zeile in Figur b) bedeutet: Datum, Zellennummer, Stratifikationscode (4=“alle Dächer”, 1=alle Gebäude, 1=beide Bebauungsart) und die Prozentzahlen für die Aufteilung Dach : Fassade (s. Text). Material 5, Dachpappe fehlt, da keine Daten.



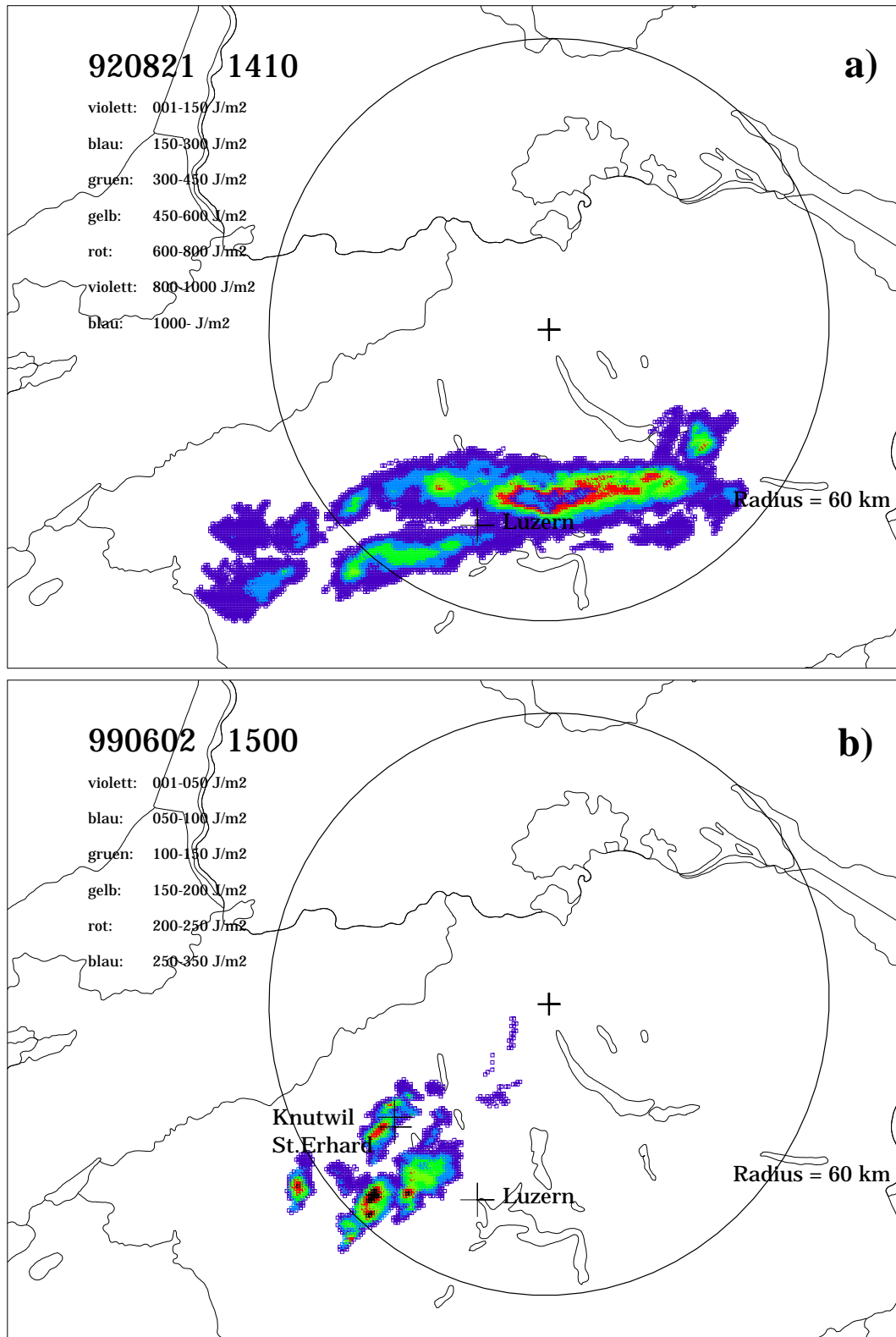
Figur 4.9 Dasselbe wie in Figur 4.8, aber für den absoluten Schaden. Der Schaden ist in 1000 Fr. (kFr) angegeben. Mögliche Regressionsgeraden sind gestrichelt angedeutet.



Figur 4.10 Streudiagramm Hagelenergie versus Schadenanteil für Materialien der Kategorie 5 “alle Fassaden”. Die Gebäudeschäden stammen vom Sturm am 2. Juni 1999 über Knutwil und St.Erhard. Von den acht Materialien zeigen die vier empfindlicheren (5-8) Schäden. Die Nummer gibt die Anzahl Objekte wieder.



Figur 4.11 Streudiagramm kinetische Hagelenergie versus Anteil betroffener Policen am Gesamtbestand versicherter Gebäude. 13 Testflächen repräsentieren unterschiedliche Gebiete an Sturmintensität (Energiewerte). Die obere Kurve ist für die Sturmgebiete mit Starkwinden angenommen worden, die untere Kurve für die ruhigeren Zonen im Sturm. Die Kurven stellen keine berechneten Beziehungen dar.



Figur 5.1 Zwei Stürme zum Vergleich: Vom 21. August 1992 (a) und vom 2. Juni 1999 (b). Die Darstellung ist dieselbe wie in Figur 2.1. Figur 5.1.b hat jedoch eine andere Intensitätsskala.

Anhang 2

Ausschnitt aus der Datensammlung Gebäudeschäden

Die Kolonnen-Nummern entsprechen den Nummern der Rubriken im Erhebungsblatt (Anhang 1).
Die Zahl -9 bedeutet keine Angaben.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
0001	12	42	470	665750	211280	1	440	-9	-9	3	1	1	0	1	-9	0	3	-9	15318	64.0	4.2	1
0002	12	42	470	665780	211210	1	440	-9	-9	1	1	3	1	0	0	0	0	0	6500	11.0	1.7	1
0003	12	42	471	665730	211060	5	450	-9	-9	3	2	3	0	1	0	0	3	-9	9595	26.0	2.7	1
0004	12	42	472	665730	211030	8	450	-9	-9	3	-9	3	1	1	0	0	1	2	6626	46.0	6.9	1
0005	12	42	478	665900	211090	2	450	-9	-9	2	0	0	0	2	0	1	0	0	1511	4.0	2.6	1
0006	12	42	478	665860	210910	5	450	-9	-9	3	1	1	0	2	0	1	0	0	1909	4.0	2.1	1
0007	12	42	479	665830	210970	2	450	-9	-9	1	1	3	1	0	0	0	0	0	2452	1.0	0.4	1
0008	12	42	479	665850	211000	2	450	-9	-9	2	0	0	0	1	4	1	0	0	2476	18.5	7.5	1
0009	12	40	1900	663760	209000	2	520	-9	-9	2	0	0	0	1	4	1	1	-9	1441	5.2	3.6	2
0010	12	40	1903	663670	209180	2	520	-9	-9	2	0	0	0	1	0	0	1	3	449	2.4	5.3	2
0011	12	40	1904	663650	209500	2	490	-9	-9	2	0	0	0	1	0	0	1	2	2537	8.0	3.2	2
0012	12	40	1909	664500	209600	2	470	-9	-9	3	-9	6	0	1	0	0	1	2	6307	38.3	6.1	2
0013	12	40	1910	663300	209500	5	500	-9	-9	2	0	0	0	1	4	1	3	2	3973	38.0	9.6	2
0014	12	40	1911	664400	210210	2	550	-9	-9	2	0	0	0	1	6	0	1	2	742	6.4	8.6	2
0015	12	40	1913	664850	210380	2	530	-9	-9	2	0	0	0	1	4	0	0	0	628	1.5	2.4	2
0016	12	40	1914	665000	210000	2	470	-9	-9	3	2	3	0	1	6	0	1	-9	4675	24.4	5.2	2
0017	12	40	1919	663700	209520	2	490	-9	-9	2	0	0	0	1	0	0	1	2	4880	33.0	6.8	2
0018	12	40	1924	664000	209800	2	480	-9	-9	2	0	0	0	1	0	0	1	2	1218	3.7	3.0	2
0019	12	47	60	655850	207250	8	820	-9	7	3	1	1	0	1	1	1	3	-9	5194	45.0	8.7	3
0020	12	47	61	-9	-9	2	-9	-9	-9	3	1	4	0	1	1	1	2	1	2203	25.4	11.5	-9
0021	12	47	63	-9	-9	2	-9	-9	-9	2	0	0	0	1	6	1	2	1	917	9.2	10.0	-9
0022	12	47	66	655900	207500	8	820	-9	-9	3	1	2	0	1	1	0	2	1	3359	45.0	13.4	3
0023	12	47	71	655750	207650	2	810	-9	-9	3	1	3	0	1	2	1	2	1	548	-9.0	-9.0	3
0024	12	47	73	655850	207650	9	820	-9	-9	3	1	1	0	1	3	1	0	0	180	3.8	21.1	3
0025	12	47	75	656300	207600	2	820	-9	-9	3	1	1	0	1	6	1	2	1	705	44.5	63.1	4
0026	12	47	77	656000	207700	2	860	-9	7	3	1	7	1	1	6	0	2	1	874	23.9	27.3	4
0027	12	47	78	656100	207950	2	860	-9	-9	3	1	4	0	1	6	1	2	1	824	44.6	54.1	3
0028	12	47	78	656100	207950	9	860	-9	-9	1	2	4	0	0	0	0	0	0	604	19.0	31.5	4
0029	12	47	79	656300	208000	2	890	-9	-9	2	0	0	0	1	2	0	0	0	539	12.0	22.3	4
0030	12	47	98	656700	207700	2	840	-9	-9	2	0	0	0	1	2	1	0	0	425	10.3	24.2	3
0031	12	47	80	656300	207600	9	830	-9	-9	1	1	6	0	0	0	0	0	0	427	1.7	4.0	3
0032	12	39	543	666200	208400	2	440	-9	-9	3	2	3	0	1	4	0	-9	-9	6650	125.5	18.9	2
0033	12	42	464	666030	211380	5	440	-9	-9	3	-9	3	1	1	1	0	2	1	2802	61.0	21.8	1
0034	12	40	3460	665625	208700	6	450	-9	-9	2	0	0	0	1	4	0	3	-9	14981	242.0	16.2	2
0035	12	40	2448	661650	209450	6	550	-9	-9	3	2	-9	0	1	0	0	3	-9	5627	73.5	13.1	2
0036	12	40	2520	665500	208900	5	460	-9	-9	3	2	-9	1	1	4	0	0	0	63467	555.6	8.8	2
0037	12	42	2342	666300	211300	1	440	-9	7	3	2	6	0	1	4	0	3	-9	48075	320.0	6.7	1