

6.2 Schwere Hagelstürme in Deutschland und Europa

MICHAEL KUNZ, SUSANNA MOHR & HEINZ JÜRGEN PUNGE

Schwere Hagelstürme in Deutschland und Europa: Schwere Hagelstürme können innerhalb von nur wenigen Minuten erhebliche Schäden in Milliardenhöhe an Gebäuden, landwirtschaftlichen Kulturen oder Fahrzeugen verursachen. Hagel entsteht in Gewitterwolken aus der Interaktion verschiedener Prozesse auf unterschiedlichen Raum- und Zeitskalen. Diese reichen von wolkenmikrophysikalischen Vorgängen im Nanometerbereich über die Entstehung von Gewitterwolken im Bereich von einigen Kilometern bis hin zu geeigneten Großwetterlagen, die sich über rund 1000 km erstrecken. Die räumliche Ausdehnung der Hagelzüge und folglich auch die Schadenflächen sind dagegen sehr stark begrenzt. Aus diesem Grund liegen nur sehr wenige zuverlässige, qualitativ hochwertige Hagelbeobachtungen über längere Zeiträume vor. Um die lokale Hagelhäufigkeit, die beispielsweise für die Quantifizierung des Hagelrisikos von Versicherungen benötigt wird, zu bestimmen, werden Hagelsignale meist indirekt aus Datensätzen verschiedener Fernerkundungssysteme (z.B. Radare, Satelliten) abgeleitet. Diesbezügliche Untersuchungen zeigen eine sehr hohe räumliche Variabilität der Hagelereignisse, die sowohl von der großräumigen Klimatologie als auch von lokalen topografischen Eigenschaften bestimmt ist. Basierend auf verschiedenen, für die Entstehung von Hagel relevanten meteorologischen Größen aus Beobachtungs- oder Modelldaten zeigen alle Studien, dass die Wahrscheinlichkeit von Hagelstürmen über Deutschland und Mitteleuropa in den vergangenen Jahren vor allem durch die Zunahme der Konvektionsenergie in der Atmosphäre angestiegen ist und in der Zukunft wohl weiter ansteigen wird.

Severe Hailstorms in Germany and Europe: Within only a few minutes, severe hailstorms can cause significant damage running into billions to buildings, agricultural crops or vehicles. Hail forms inside of thunderstorm clouds due to the interaction of different processes on different spatial and temporal scales. These range from cloud microphysics on the nanometer scale to the formation of storm clouds on the kilometer scale to large-scale weather conditions that extend to around 1000 kilometers. The spatial extent of the hailstreaks and, consequently, also the damage patterns are spatially very limited. For this reason, there is a significant lack of reliable, high-quality observational hail data over longer periods. In order to determine the local hail frequency, which is needed, for example, by the insurance industry to quantify the hail risk, hail signals are usually determined indirectly using datasets from remote sensing instruments such as radars or satellites. Related examinations reveal a very high spatial variability of the hail events, which is determined by both the large-scale climatology and local-scale topographic characteristics. Based on various meteorological parameters relevant to the formation of hailstorms gained from observations or model data, studies show that the probability of hailstorms over Germany and central Europe has increased over recent years, above all due to the increase in convective energy in the atmosphere, and likely will continue to increase over future decades.

Hagel verursacht immer wieder erhebliche Schäden an Gebäuden, Fahrzeugen und landwirtschaftlichen Kulturen. Die damit verbundenen Schadensummen können in Einzelfällen mehrere Milliarden Euro betragen. Nach Versicherungsdaten sind die jährlichen Schadensummen durch Hagel in Mitteleuropa in den letzten Jahren deutlich angestiegen (MUNICH RE 2018). Handelt es sich hierbei um ein Warnsignal des Klimas? Welche Regionen sind besonders häufig von Hagel betroffen? Und was sind die Gründe dafür? Diese zentralen Fragen sollen auf den nächsten Seiten beantwortet werden. Zunächst werden aber einige Grundlagen erläutert.

Hagel besteht aus gefrorenem Wasser mit vielen kleinen Luftpfeilschlüssen. Die Form der Hagelkörner ist sehr variabel und kann vollkommen rund, konisch, oval, oder abgeplattet sein, teilweise mit unregelmäßigen säulenförmigen Anlagerungen. Definitionsgemäß hat Hagel einen Durchmesser von mindestens 5 mm. In seltenen Fällen können Hagelkörner aber die Größe von Tennisbällen oder Grapefruits erreichen. Das bisher größte in Deutschland dokumentierte Hagelkorn hatte einen Durchmesser von 14,1 cm bei einem Gewicht von 360 g

(6. August 2013, Gemeinde Sonnenbühl). Das weltweit größte gefundene Hagelkorn war 20 cm groß und wog 880 g (23. Juli 2010 Vivian, South Dakota, USA).

Hagel bildet sich im Aufwindbereich großer organisierter Gewittersysteme wie Multizellen, Superzellen oder mesoskaligen konvektiven Systemen (konvektiv bezeichnet dabei den vertikalen Massentransport, der bei Gewittern entscheidend ist). Für Gefrierprozesse in den Wolken werden spezielle Aerosolpartikel, sogenannte Eiskeime, benötigt. Da diese aber nur in sehr geringen Konzentrationen von typischerweise 1-10 Teilchen pro Liter Luft vorkommen, herrscht im Temperaturbereich zwischen 0 und -38°C üblicherweise eine hohe Konzentration an unterkühlten Tröpfchen vor – Wasser, das trotz einer Temperatur unterhalb des Gefrierpunkts noch flüssig ist (PRUPPACHER & KLETT 2010). Treffen diese unterkühlten Tröpfchen auf eines der wenigen Eisteilchen, kommt es zum spontanen Gefrieren (Bereifen), bis sich daraus Graupel und schließlich Hagel bildet. Je höher die Aufwindgeschwindigkeit, je länger die Verweildauer der Eisteilchen und je höher die Konzentration der unterkühlten Tröpfchen im

Hebungsbereich einer Gewitterzelle sind, desto größer können die Hagelkörner werden. Die größten Hagelkörner entstehen in sogenannten Superzellen, die besonders starke, rotierende und persistente Aufwindgebiete erzeugen. Für deren Bildung ist neben den Bedingungen, die für Gewitter notwendig sind, wie einem hohen Feuchtegehalt in den bodennahen Luftschichten und einer grossen vertikalen Temperaturdifferenz, auch eine starke Zunahme und Richtungsänderung des Windes mit der Höhe (vertikale Windscherung) erforderlich.

Da der Aufwindbereich von Gewittersystemen sowohl zeitlich als auch räumlich stark begrenzt ist, sind die von Hagel betroffenen Flächen, die sogenannten Hagelstriche, meist ebenfalls nur sehr kleinräumig. In den USA wurde beobachtet, dass über 80% aller untersuchten Hagelstriche eine Ausdehnung von maximal 40 km² aufwiesen (CHAGNON 1970). Auch wenn für Europa derartige Informationen nicht vorliegen, kann von einer ähnlichen Größenordnung ausgegangen werden. Eine radarbasierte Analyse von Schwergewittern in Deutschland ergab hier eine mittlere Länge von $48,0 \pm 46,7$ km (Mittel und Standardabweichung; PUSKEILER et al. 2016).

Wegen der geringen räumlichen Ausdehnung der Hagelstriche lässt sich deren Auftrittswahrscheinlichkeit nicht direkt aus Stationsmessungen ableiten. Jedoch kann in gewissen Grenzen aus Daten von Fernerkundungssystemen wie Niederschlagsradaren oder Satelliten indirekt, also mittels sogenannter Proxys, auf Hagel geschlossen werden (s. 3. Abschnitt). Darüber hinaus können die atmosphärischen Bedingungen, die für die Entstehung von Hagelstürmen relevant sind, aus beobachteten oder modellierten Vertikalprofilen geeigneter meteorologischer Größen ermittelt werden, die meist über mehrere Jahrzehnte in der Vergangenheit (s. 4. Abschnitt) und der Zukunft (s. 5. Abschnitt) verfügbar sind.

Schäden durch Hagel

Hagelkörner erreichen recht hohe Fallgeschwindigkeiten zwischen 30 und 150 km/h. Die damit verbundene kinetische Energie wird beim Aufprall auf eine kleine Fläche konzentriert, so dass Dachpfannen und Glas zerspringen, Bleche Dellen erhalten oder Feldfrüchte wie beispielsweise Äpfel und Weintrauben erheblich geschädigt werden können. Der Umfang der Schäden wird in erster Linie durch die Größe der Hagelkörner und die betroffene Fläche bestimmt. In Europa sind hohe Schadenssummen vor allem durch Gebäude- und Fahrzeugschäden bedingt; größere Schäden treten hier bei Korndurchmessern ab 3 bis 4 cm auf (GESSLER & PETTY 2013). Der überwiegende Teil der Gebäudeschäden entfällt dabei auf die Dächer. Werden diese zerstört, kann es durch eindringendes Wasser zu massiven Folgeschäden kommen. Landwirtschaftliche Kulturen hingegen

können bereits bei kleineren Hagelkörnern mit einem Durchmesser von weniger als 1 cm nachhaltig geschädigt werden. Für das Schadenausmaß sind hier neben der Kulturart und dem Wachstumsstadium vor allem auch die Anzahl der Hagelkörner pro Flächeneinheit und die horizontale Windgeschwindigkeit entscheidend (siehe auch Kap. SEIDEL in diesem Band). Bei Betrachtung der Sachschäden ist weiterhin zu beachten, dass die Anzahl, die Wertentwicklung und die Vulnerabilität der verwendeten Materialien der jeweiligen Objekte eine wichtige Rolle spielen. Diese Faktoren, die sowohl räumlich als auch zeitlich stark variieren, erschweren sowohl den Vergleich einzelner Schadenereignisse als auch die Bestimmung von Trends aus Schadendaten. So fanden beispielsweise KUNZ et al. (2009) in Versicherungsdaten für Baden-Württemberg im Zeitraum von 1986 bis 2004 einen massiven Anstieg sowohl der Hagelschäden als auch der Schadentage. Dieser starke positive Trend spiegelt sich hingegen nur sehr abgeschwächt in den meteorologischen Bedingungen, die für Hagel relevant sind, wider (siehe Abschnitt 4).

Im Versicherungssektor werden in der Regel Schadenereignisse zusammengefasst, die innerhalb von 72 Stunden in Verbindung mit einer vorherrschenden Wetterlage auftreten. Das nach dieser Definition bisher teuerste Schadenereignis war das Hagelunwetter von Reutlingen am 28. Juli 2013 (s. Abb. 6.2-1), das zusammen mit dem Hagelzug über Hannover-Wolfsburg einen Tag zuvor Gesamtschäden in Höhe von 3,6 Mrd. € verursachte (SWISS RE 2014). Die versicherten Schäden in Höhe von 2,8 Mrd. € an diesen beiden Tagen repräsentieren den höchsten versicherten Schaden im Jahr 2013 durch Naturkatastrophen weltweit (MUNICH RE 2014). Ähnlich hohe Hagelschäden traten vom 7.-9. Juni 2014 im Umfeld von Tief Ela in Frankreich und Belgien auf. Die größten Schäden verursachten dabei ein Hagelsturm am 8. Juni nördlich von Paris und in der Picardie mit bis zu 9 cm großen Hagelkörnern sowie ein weiterer am nächsten Tag mit bis zu 11 cm großen Körnern südlich und südwestlich von Paris (NUSSBAUM 2017). Bei insgesamt rund 500.000 Einzelschäden betragen die Schadenssummen rund 850 Mio. € in Frankreich und 340 Mio. € in Belgien.

Für die Abschätzung des Hagelrisikos benötigen Versicherungen möglichst detaillierte Informationen über die Häufigkeit und die Intensität der Hagelstriche. In neueren Modellen werden dabei indirekte Hagelbeobachtungen mittels Wetterradaren (SCHMIDBERGER 2018) oder Satelliten (PUNGE et al. 2014) über mehrere Jahre statistisch ausgewertet und Verteilungsfunktionen für die Eigenschaften der Hagelstriche wie Länge, Breite und Erstreckungsrichtung ermittelt. Informationen der mittleren und maximalen Hagelkorn-

durchmesser basierend auf Augenzeugenberichten sind aus Datenbanken wie der European Severe Weather Database verfügbar (ESWD; DOTZEK et al. 2009). Mit Hilfe einer stochastischen Modellierung wird daraus ein Vielfaches an hypothetischen Hagelstrichen erzeugt, so dass auch extrem selten auftretende Ereignisse erfasst werden und der zu erwartende Schaden – beispielsweise für eine statistische Wiederkehrperiode von 200 Jahren, die von Versicherungen für die Berechnung des Solvenzkapitals benötigt wird – abgeschätzt werden kann. Im langjährigen Mittel betragen die jährlichen versicherten Hagelschäden in Deutschland zusammen für Gebäude, Kasko und Landwirtschaft rund 1,1 Mrd. € (GDV 2017).

Regionale Hagelhäufigkeit

Aufgrund der speziellen atmosphärischen Bedingungen, die für die Entstehung von Hagel notwendig sind, treten diese Ereignisse nur recht selten in einem Gebiet auf. Hagel wird selten in hohen Breiten beobachtet, da hier die Stabilität der Atmosphäre meist hoch ist. Ebenso selten ist Hagel in den Tropen, wo die Eisbildung erst in größeren Höhen stattfindet und so ein effektives Wachstum behindert wird; außerdem schmelzen vor allem kleine Hagelkörner durch die hohen Temperaturen und den langen Fallweg zum Boden (PRUPPACHER & KLETT 2010; ALLEN et al. 2015; PUNGE et al. 2017; BEDKA et al. 2018).

Hagelgewitter lassen sich recht gut aus Radardaten bestimmen, auch wenn eine scharfe Abgrenzung zu Starkregen nicht möglich ist. Bei konventionellen Ra-

daten werden Hagelsignale entweder aus der maximalen Radarreflektivität oder aus der beobachteten Vertikalstruktur der Gewitterwolken abgeleitet (z.B. KUNZ & KUGEL 2015; PUSKEILER et al. 2017). Moderne Radargeräte, die Strahlung in zwei senkrecht aufeinander stehenden Polarisationsrichtungen aussenden und empfangen, ermöglichen es, verschiedene Niederschlagsklassen zu unterscheiden und damit auch Hagel zu detektieren (z.B. VIVEKANANDAN et al. 1999). Diese sogenannten Dual-Polarisationsradare sind in Europa allerdings erst seit einigen Jahren verfügbar, so dass für Langzeitstudien auf konventionelle Geräte zurückgegriffen werden muss.

Mithilfe dreidimensionaler Radardaten bestimmte beispielsweise SCHMIDBERGER (2018) flächendeckend die Hagelhäufigkeit zwischen 2005 und 2017 in Deutschland. Die Ergebnisse zeigen eine Zunahme der Hageltage von Norden nach Süden sowie einige lokale Maxima über und stromab von Mittelgebirgen mit bis zu drei Hageltagen pro Jahr und pro Quadratkilometer (siehe *Abb. 6.2-2*). Diese Maxima konnten zum Teil auf Umströmungseffekte der Berge und damit verbundene Strömungskonvergenzen im Lee zurückgeführt werden (KUNZ & PUSKEILER 2010). Studien basierend auf zweidimensionalen Radarreflektivitäten zeigen hier ähnliche räumliche Verteilungen der Hagelsignale (JUNGHÄNEL et al. 2016; FLUCK 2017). In Frankreich ist die Region um das Zentralmassiv im Südosten Frankreichs mit bis zu 4,5 Hageltagen pro Jahr und Quadratkilometer am stärksten von Hagel betroffen (FLUCK 2017). Im Alpenraum (Schweiz und Österreich) tritt Hagel am häufigsten in den Voralpen auf, während in der Nähe des Alpenhauptkamms die Gewitter- und Hagelhäufigkeit aufgrund der geringeren Temperaturen und dem daraus resultierenden reduzierten Feuchtegehalt gering ist (NISI et al. 2016).

Auf kontinentaler Ebene stehen Radardaten nicht im benötigten Umfang und mit der notwendigen Qualität zur Verfügung. Hier bietet sich als Hilfsgröße das konvektive Überschießen in Gewitterwolken an, das in Aufnahmen von Wettersatelliten detektiert werden kann. Im Auftriebsbereich starker Gewitter steigt die Luft trägheitsbedingt kurzfristig über das eigentlich begrenzende Gleichgewichtsniveau hinaus auf. Diese überschießenden Wolkenteile (*overshooting top*, OT) treten als besonders kalte Pixel in Infrarotbildern von Satellitenbeobachtungen hervor (BEDKA 2011). Eine daraus abgeleitete Klimatologie zeigt für Europa besonders hohe Häufigkeiten über dem südlichen und nördlichen Alpenvorland, in den Pyrenäen, den Karpaten und über Mittelgebirgen wie dem Zentralmassiv (PUNGE et al. 2017).

Übereinstimmend zeigen verschiedene Studien, dass sowohl der Abstand zum Meer als auch die Topografie die wichtigsten Einflussfaktoren für die lokale Hagelhäufigkeit in Europa sind (PUNGE & KUNZ 2016).



Abb. 6.2-1: Verschiedene Formen großer schadenrelevanter Hagelkörner (oben; www.pixabay.com) und typische Schadenmuster an Gebäuden (hier nach dem schweren Hagelsturm in Reutlingen am 28.07.2013; unten, M. SCHMIDBERGER).

Durch Verdunstungsprozesse über dem Meer wird zwar hinreichend Feuchtigkeit zur Verfügung gestellt, allerdings kommt es aufgrund der guten Durchmischung der oberen Ozeansichten und der hohen Wärmekapazität von Wasser zu einer Dämpfung der Temperaturamplitude im Tagesverlauf und somit zu einer Stabilisierung der Luftmassen. In Mittelgebirgen und im Gebirgsvorland werden durch topografische Erhebungen lokale Windsysteme initiiert, die ein wichtiger Auslösemechanismus für Gewitter sind.

Neben den Hagelhäufigkeiten zeigen sich auch erhebliche regionale Unterschiede in den Tages- und Jahresgängen der Hagelereignisse. Während beispielsweise im Süden Frankreichs die meisten Hagelstürme im Juni auftreten, liegt das Maximum im Norden Frankreichs und über weiten Teilen Deutschlands im Juli (PUSKEILER et al. 2016; FLUCK 2017). Am häufigsten hagelt es in den Nachmittagsstunden zwischen 15 und 17 Uhr Lokalzeit, wenn die Sonneneinstrahlung den Boden stark aufgewärmt hat. In topografisch stark gegliederten Regionen zeigen sich dagegen aufgrund verschiedener Auslösemechanismen der Gewitter deutliche räumliche Unterschiede in den Tagesgängen. So wird beispielsweise in der Schweiz das Maximum der Hagelhäufigkeit auf der Alpennordseite rund zwei Stunden früher beobachtet im Vergleich zum Tessin (NISI et al. 2016).

Trends in der Vergangenheit

Mögliche Veränderungen der Hagelgefährdung in einem sich wandelnden Klima sind sehr schwer zu untersuchen und zu bewerten. Bereits der letzte IPCC Sonderbericht, der den Effekt des Klimawandels auf Wetterextreme und

Naturkatastrophen behandelt, fasste zusammen, dass der Einfluss des Klimawandels auf schwere Gewitterereignisse verbunden mit Hagelschlag noch nicht hinreichend verstanden ist, um verlässliche Aussagen über deren vergangene und zukünftige Entwicklung treffen zu können (SREX 2012). Die Gründe für diese Schwierigkeiten liegen einerseits in den nur wenigen verfügbaren direkten Beobachtungen. Andererseits sind regionale Klimamodelle (RCM) oder Reanalysen (noch) nicht in der Lage, Hagelstürme verlässlich zu simulieren. Zwar können hochaufgelöste numerische Modelle mit komplexen mikrophysikalischen Schemata die Entstehung von Graupel und Hagel annähernd realistisch simulieren (z.B. KUNZ et al. 2018), allerdings sind der damit verbundene Rechenaufwand und die Unsicherheiten bei den mikrophysikalischen Parametern (z.B. Aerosolkonzentration) zu hoch, um diese Modelle derzeit operationell in der Wettervorhersage oder der Klimamodellierung einzusetzen. Weiterhin sind die wolkenmikrophysikalischen Prozesse, welche die Auftrittswahrscheinlichkeit und die Schwere der Hagelereignisse bestimmen, noch nicht vollständig verstanden. So ist beispielsweise noch unklar, welche Auswirkungen eine wärmere untere Troposphäre und ein damit verbundenes Anheben der Schmelzschichthöhe auf die Hagelbildung hat.

Um dennoch Aussagen über eine mögliche Änderung der Hagelhäufigkeit in der Vergangenheit und Zukunft ableiten zu können, werden verschiedene meteorologische Größen als Proxys berücksichtigt, die für die Gewitter- oder Hagelentstehung wichtig sind. Relevant sind hier insbesondere die Stabilität, der Feuchtegehalt der Atmosphäre und die vertikale Windscherung. Diese Proxys geben aber nur das Potential der Atmosphäre für die Hagelbildung wieder und lassen keine Aussage über tatsächliche Ereignisse zu. Dennoch erlaubt diese Methode eine quasi-homogene Langzeitbeurteilung der Gewitter-/Hagelaktivität.

Statistische Analysen der langfristigen Veränderungen des Gewitter-/Hagelpotentials basieren auf verschiedenen Proxys wie hagelrelevanten Wetterlagen (KAPSCH et al. 2012; PIPER 2017), Konvektionsparameter (KUNZ et al. 2009; MOHR & KUNZ 2013) oder einer Kombination aus verschiedenen hagelrelevanten Größen (MOHR et al. 2015A, B; RÄDLER et al. 2017). Die verschiedenen Studien zeigen dabei übereinstimmend, dass in Deutschland und Teilen Europas das Potential für die Entstehung von Gewittern und Hagel etwa seit 1980 in moderater Weise zugenommen hat. Langfristige Trendanalysen seit 1950 weisen allerdings darauf hin, dass eine hohe jährliche und mehrjährige Variabilität das Trendsinal in der Vergangenheit dominiert hat (MOHR et al. 2015B; PIPER 2017), was für längere Zeiträume zu nicht signifikanten Trends führt (Abb. 6.2-3).

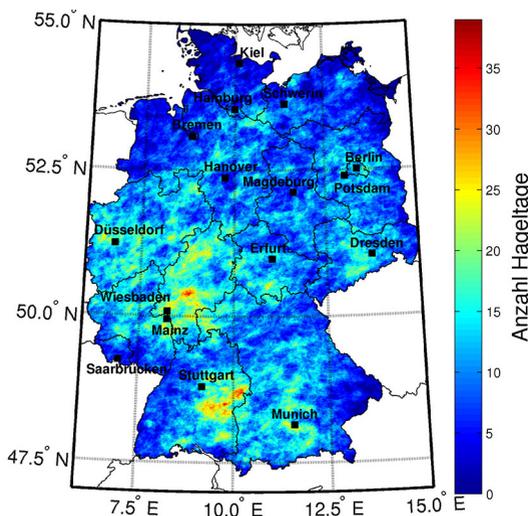


Abb. 6.2-2: Gesamtanzahl der aus Radardaten bestimmten Hageltage in Deutschland zwischen 2005 und 2017 für Flächen der Größe $1 \times 1 \text{ km}^2$ (SCHMIDBERGER 2018).

Bei der langzeitlichen Betrachtung des Gewitter-/Hagelpotentials spielt auch die natürliche Klimavariabilität eine erhebliche Rolle (ALLEN et al. 2015). Für Europa konnte PIPER (2017) zeigen, dass bestimmte Telekonnectionsmuster (Fernwirkungen von Wettervorgängen zwischen zwei weit voneinander entfernten Gebieten) wie die Nordatlantische Oszillation (NAO) in Kombination mit der Meeresoberflächentemperatur im Golf von Biskaya einen signifikanten Einfluss auf die Gewitter-/Hagelaktivität in bestimmten Regionen hat. Ob der beobachtete Anstieg des Gewitterpotentials ausschließlich durch den Klimawandel bestimmt ist oder zum Teil durch die natürliche Klimavariabilität beeinflusst wird, konnte noch nicht geklärt werden.

Zukünftige Entwicklung

Wie bereits oben beschrieben, können regionale Klimamodelle Hagel nicht direkt simulieren, sodass auch hier Aussagen über zukünftige Änderungen der Hagelhäufigkeit nur indirekt über geeignete Proxys möglich sind. Die wenigen verfügbaren Studien für Deutschland und Europa deuten auf eine weitere Zunahme des Hagelpotentials hin (MARSH et al. 2009; KAPSCH et al. 2012; GERSTENGARBE et al. 2013; MOHR et al. 2015A; PÚČIK et al. 2017). Nach MOHR et al. (2015A) beispielsweise ergibt sich für Deutschland nach einem logistischen Hagelmodell, das auf ein Ensemble aus sieben RCMs angewendet wurde, ein leichter Anstieg der Hagelwahrscheinlichkeit für die Periode 2021 bis 2050, wobei die Änderungen nur im Nordwesten und Süden Deutschlands statistisch signifikant sind (Abb. 6.2-4) sind. Dabei projizieren die einzelnen Modelle/Szenarien eine Zunahme zwischen 4 und 41%. Für Europa berechnet PÚČIK et al. (2017) basierend auf einem Ensemble aus 14 Klimasimulationen den stärksten Anstieg für das Ende des aktuellen Jahrhunderts (2071-2100) mit robusten Änderungen vor allem in den meisten Regionen Süd-, Zentral-, Mittel- und Osteuropas. Für die Mitte des aktuellen Jahrhunderts deuten die Modelle hingegen nur eine leichte Veränderung an, und

die Änderungssignale sind weniger signifikant. Beide Arbeiten betonen eine hohe Variabilität zwischen den in den Ensembles verwendeten Klimäläufen und den daraus resultierenden Trends. Die zukünftigen Änderungen können in erster Linie auf eine Abnahme der atmosphärischen Stabilität zurückgeführt werden, die aus einem Anstieg des Feuchtegehalts in der unteren Troposphäre resultiert (HELD & SODEN 2006; PÚČIK et al. 2017).

Eine vielversprechende Methode, mit der sich potentielle Änderungen des Gewitter- und Hagelpotentials in der Zukunft besser abschätzen lassen, basiert auf der Simulation von Starkgewitterepisoden mit einem räumlich hochaufgelösten Wettervorhersagemodell, dem die projizierten Änderungen von Temperatur-, Feuchte- und Windprofilen aus Klimamodellen künstlich aufgeprägt werden (pseudo-global warming; KAWASE et al. 2009). Erste Arbeiten für die Schweiz weisen darauf hin, dass in einem wärmeren Klima schwere Hagelereignisse wahrscheinlicher werden, aber auch ein verstärktes Abschmelzen von kleineren Hagelkörnern stattfinden wird (MARTYNOW et al., 2017).

Schlussfolgerungen und Forschungsbedarf

In den letzten Jahren hat die Hagelforschung in Europa erhebliche Fortschritte gemacht (z.B. MARTIUS et al. 2017). Basierend auf hochaufgelösten Radardaten und Satellitendaten konnten für verschiedene Regionen erstmals flächendeckende Hagelwahrscheinlichkeiten bestimmt werden. Alle diesbezüglichen Studien belegen eine sehr hohe räumliche Variabilität der Hagelereignisse, die sowohl von der großräumigen Klimatologie (Stabilität, Windscherung, Frontendichte) als auch von lokalen topografischen Eigenschaften (Sekundärzirkulationen, Konvergenzzonen) bestimmt ist. Problematisch bei diesen Untersuchungen sind die noch immer kurzen Zeiträume der verfügbaren Beobachtungen und die doch relativ hohen Fehlalarmraten (rund 30%) von Fernerkundungsdaten als Proxy für Hagel. Im letzten Fall können polarimetrische Messungen von Dual-Pol-Radaren,

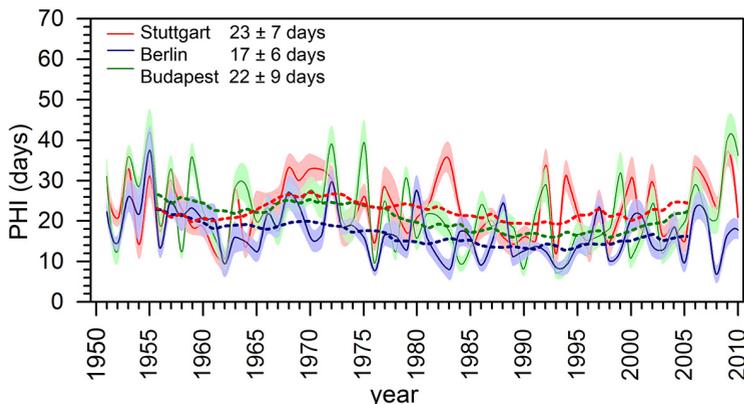


Abb. 6.2-3: Zeitreihe des potentiellen Hagelindex (PHI) an den Gitterpunkten um die Städte Stuttgart (rot), Berlin (blau) und Budapest (grün), basierend auf den Reanalysen CoastDat II. Der PHI gibt an, an wie vielen Tagen im Jahr (Sommermonate) das Potential für Hagel aufgrund verschiedener meteorologischer Größen erhöht ist (MOHR et al. 2015).

die seit einigen Jahren viele konventionelle Radargeräte in Europa ersetzt haben, die Detektionsgüte von Hagel zukünftig erheblich verbessern. Aktuell erschweren außerdem technische Spezifika der Systeme (z.B. unterschiedliche Kalibrierungen der Radare, unterschiedliche Wellenlängen und Auflösungen) die Vergleichbarkeit der radarbasierten Hagelstatistiken zwischen den verschiedenen Radarnetzwerken. Auf kontinentaler Ebene bietet sich daher als Proxy für Hagel das konvektive Überschießen in Gewitterwolken an, das homogen aus Satellitendaten bestimmt werden kann.

In Bezug auf die Frage, ob durch den Klimawandel Hagelstürme häufiger zu erwarten sind, deuten erste Arbeiten generell auf mehr und intensivere Hagelstürme in einem sich erwärmenden Klima hin. Allerdings sind die Unsicherheiten der Ergebnisse noch recht groß. Erhebliche Wissensdefizite bestehen vor allem darin, wie sich relevante mikrophysikalische Prozesse einschließlich der vorhandenen Aerosolkonzentrationen in einem wärmeren Klima ändern und welche Rolle die natürliche Klimavariabilität inklusive der Telekonnektionen bei der lokalen Häufigkeit der Hagelereignisse spielt.

Für eine verlässliche Vorhersage von Hagelstürmen auf unterschiedlichen Zeitskalen – vom Nowcasting bis hin zu Klimaprojektionen – sind weitere Verbesserungen der mikrophysikalischen Parametrisierungen in den numerischen Modellen notwendig. Dies erfordert aber auch mehr Wissen über Gefrierprozesse in kon-

vektiven Wolken und über das Hagelwachstum, beispielsweise mit Hilfe von Laboruntersuchungen. Die Assimilation von Radardaten in ein Ensemble hochaufgelöster numerischer Wettervorhersagesysteme hat ein enormes Potenzial, die Vorhersage von Hagel auf kurzen Zeitskalen im Bereich von Minuten und Stunden und damit auch die Warnung vor derartigen Ereignissen maßgeblich zu verbessern.

Ein noch immer ungelöstes Problem bei allen Arbeiten zu Hagel ist der Mangel an zuverlässigen, qualitativ hochwertigen Langzeitbeobachtungen, um damit die verschiedenen Proxys aus Beobachtungs- und Modelldaten besser anzupassen und zu kalibrieren. Hier haben Informationen aus sozialen Medien (Crowdsourcing) ein hohes Potential, diese Lücke zumindest teilweise zu schließen (z.B. European Weather Observer App, EWOB, oder MeteoSchweiz App).

Literatur

- ALLEN, J. T., M. K. TIPPETT & A. H. SOBEL (2015): Influence of the El Niño/Southern Oscillation on tornado and hail frequency in the United States. *Nature Geoscience*, 8, 278-283.
- BEDKA, K. M. (2011): Overshooting cloud top detections using MSG SEVIRI Infrared brightness temperatures and their relationship to severe weather over Europe. *Atmospheric Research*, 99, 175-189.
- BEDKA, K. M., J. T. ALLEN, H. J. PUNGE et al. (2018): A long-term overshooting convective cloud top detection database over Australia derived from MTSAT Japanese advanced meteorological imager observations. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, doi:10.1175/JAMC-D-17-0056.1.
- CHANGNON JR, S. A. (1977): The scales of hail. *Journal of Ap-*

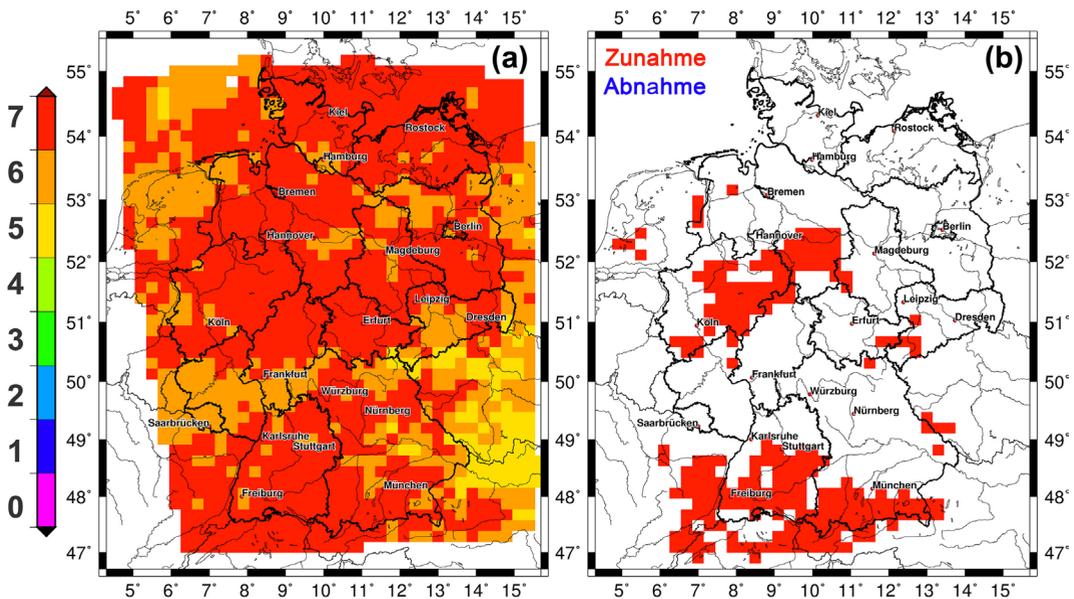


Abb. 6.2-4: Anzahl der regionalen Klimamodelle, die für den PHI eine Zunahme in der Periode 2012-2050 gegenüber der Vergangenheit 1971-2000 projizieren (a). An den meisten Gitterpunkten zeigen alle sieben verwendeten Modelle eine Zunahme, die aber nur an wenigen Gitterpunkten, vor allem im Süden und in der Mitte Deutschlands, signifikant ist (b; nach MOHR et al.; 2015A).

- plied Meteorology, 16, 626-648.
- GERSTENGARBE, F.-W., P. C. WERNER, H. ÖSTERLE & O. BURGHOF (2013): Winter storm- and summer thunderstorm-related loss events with regard to climate change in Germany. Theoretical and Applied Climatology, 114, 715-724.
- HELD, I. M. & B. J. SODEN, 2006: Robust responses of the hydrological cycle to global warming. Journal of Climate, 19, 5686-5699.
- DOTZEK, N., P. GROENEMEIJER, B. FEUERSTEIN & A. M. HOLZER (2009): Overview of ESSL's severe convective storms research using the European Severe Weather Database ESWD. Atmospheric Research, 93, 575-586.
- FLUCK, E. (2017): Hail potential over Western Europe. Dissertation am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, Deutschland, doi: 10.5445/IR/1000080663.
- GDV (2017): Naturgefahrenreport 2017, Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft, Berlin, Deutschland. www.gdv.de/naturgefahrenreport.
- GESSLER, S. E. & S. E. PETTY (2013): Hail fundamentals and general hail-strike damage assessment methodology. In: Forensic Engineering: Damage Assessments for Residential and Commercial Structures, S.E. Petty (Hrsg.), 52-65, CRC Press, Boca Raton, USA.
- JUNGHÄNEL, T., C. BRENDEL, T. WINTERRATH & A. WALTER (2016): Towards a radar-and observation-based hail climatology for Germany. Meteorologische Zeitschrift, 25, 435-445.
- KAPSCH, M.-L., M. KUNZ, R. VITOLO & T. ECONOMOU (2012): Long-term trends of hail-related weather types in an ensemble of regional climate models using a Bayesian approach, Journal of Geophysical Research, 117, D15107.
- KAWASE, H., T. YOSHIKANE, M. HARA et al. (2009): Inter-model variability of future changes in the Baiu rainband estimated by the pseudo global warming downscaling method. Journal of Geophysical Research, 114, D24110.
- KUNZ, M., J. B. SANDER & CH. KOTTMEIER (2009): Recent trends of thunderstorm and hailstorm frequency and their relation to atmospheric characteristics in southwest Germany. International Journal of Climatology, 29, 2283-2297.
- KUNZ, M. & M. PUSKEILER (2010): High-resolution assessment of the hail hazard over complex terrain from radar and insurance data. Meteorologische Zeitschrift, 19, 427-439.
- KUNZ, M. & P. I. KUGEL (2015): Detection of hail signatures from single-polarization C-band radar reflectivity. Atmospheric Research, 153, 565-577.
- KUNZ, M., U. BLAHAK, J. HANDWERKER et al. (2018): The severe hailstorm in southwest Germany on 28 July 2013: Characteristics, impacts, and meteorological conditions. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 144, 231-250.
- MARSH, P. T., H. E. BROOKS & D. J. KAROLY (2009): Preliminary investigation into the severe thunderstorm environment of Europe simulated by the Community Climate System Model 3. Atmospheric Research, 93, 607-618.
- MARTIUS, O., A. HERING, M. KUNZ et al. (2017): Challenges and recent advances in hail research – A report from the 2nd European Hail Workshop. Bulletin of the American Meteorological Society, doi:10.1175/BAMS-D-17-0207.1.
- MARTYNOW, A., L. NISI & O. MARTIUS (2017): Summertime hailstorms over Switzerland in surrogate climate change simulations. 2nd European Hail Workshop, 25.-27.06.2017, Bern, Schweiz.
- MOHR, S. & M. KUNZ (2013): Recent trends and variabilities of convective parameters relevant for hail events in Germany and Europe. Atmospheric Research, 123, 211-228.
- MOHR, S., M. KUNZ & K. KEULER (2015A): Development and application of a logistic model to estimate the past and future hail potential in Germany. Journal of Geophysical Research, 120, 3939-3956.
- MOHR, S., M. KUNZ & B. GEYER (2015B): Hail Potential in Europe based on a regional climate model hindcast. Geophysical Research Letters, 42, 10904-10912.
- MUNICH RE (2018): NatCatSERVICE - Natural catastrophe know-how for risk management and research. Available online at <http://natcatservice.munichre.com>
- MUNICH RE (2014): Topics Geo: Natural catastrophes 2013 – Analyses, assessments, positions, Munich Re, Germany.
- NISI, L., O. MARTIUS, A. HERING et al. (2016): Spatial and temporal distribution of hailstorms in the Alpine region: a long-term, high resolution, radar-based analysis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 142, 1590-1604.
- NUSSBAUM, R. (2017): Tempête de grêle Ela 6 auf 10 juin 2014 - Etude des dommages au bâti par l'exploitation des données d'expertise d'assurance. Mission Risques Naturels, Paris, Frankreich. <http://www.mrn.asso.fr/wp-content/uploads/2018/02/2017-rapport-grêle-conference-b3-mrn.pdf>
- PIPER (2017): Untersuchung der Gewitteraktivität und der relevanten großräumigen Steuerungsmechanismen über Mittel- und Westeuropa. Wiss. Berichte d. Instituts für Meteorologie und Klimaforschung des Karlsruher Instituts für Technologie, Vol. 73, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, Deutschland, doi:10.5445/KSP/1000072089.
- PÚČIK, T., P. GROENEMEIJER, A. T. RÄDLER et al. (2017): Future changes in European severe convection environments in a regional climate model ensemble. Journal of Climate, 30, 6771-6794.
- PUNGE, H. J., A. WERNER, K. BEDKA & M. KUNZ (2014): A new physically based stochastic event catalogue for hail in Europe. Natural Hazards, 73, 1625-1645.
- PUNGE, H. J. & M. KUNZ (2016): Hail observations and hailstorm characteristics in Europe: A review. Atmospheric Research, 176, 159-184.
- PUNGE, H. J., K. M. BEDKA, M. KUNZ & A. REINBOLD (2017): Hail frequency estimation across Europe based on a combination of overshooting top detections and the ERA-INTERIM reanalysis. Atmospheric Research, 198, 34-43.
- PUSKEILER, M., M. KUNZ & M. SCHMIDBERGER (2016): Hail statistics for Germany derived from single-polarization radar data. Atmospheric Research, 178, 459-470.
- PRUPPACHER, H. R. & J. D. KLETT (2010): Microphysics of clouds and precipitation. Atmospheric and Oceanographic Sciences Library Vol. 18, Springer, Dordrecht, Niederlande.
- RÄDLER, A.T., P. GROENEMEIJER, E. FAUST, & R. SAUSEN (2017): Detecting severe weather trends using an Additive Regressive Convective Hazard Model (AR-CHaMo). Journal of Applied Meteorology and Climatology, 57, 569-587.
- SCHMIDBERGER, M. (2018): Hagelgefährdung und Hagelrisiko in Deutschland basierend auf einer Kombination von Radardaten und Versicherungsdaten. Dissertation am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Deutschland.
- SREX (2012): Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. A special report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, USA.
- SWISS RE (2014): Sigma - Natural catastrophes and man-made disasters in 2013. Swiss Re Economic Research and Consulting, Zürich, Schweiz.
- VIVEKANANDAN, J., D. S. ZRNIC, S. M. ELLIS et al. (1999): Cloud microphysics retrieval using S-band dual-polarization radar measurements. Bulletin of the American Meteorological Society, 8, 381-388.

Kontakt:

Prof. Dr. Michael Kunz (michael.kunz@kit.edu)

Dr. Susanna Mohr

Dr. Heinz Jürgen Punge

Institut für Meteorologie und Klimaforschung (IMK-TRO)
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Kunz, M., S. Mohr & H. J. Punge (2018): Schwere Hagelstürme in Deutschland und Europa. In: Lozán, J. L., S.-W. Breckle, H. Graßl, D. Kasang & R. Weisse (Hrsg.). Warnsignal Klima: Extremereignisse. pp. 236-242. Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. doi: 10.2312/warnsignal.klima.extremereignisse.35.