



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Swiss Confederation

Federal Department of Home Affairs FDHA  
Federal Office of Meteorology and Climatology MeteoSwiss

**MeteoSwiss**

**Fachbericht MeteoSchweiz No. 283**

# **Hagelklima Schweiz: Daten, Ergebnisse und Dokumentation**

Katharina Schröder, Simona Trefalt, Alessandro Hering, Urs Germann, Cornelia Schwierz





ISSN: 2296-0058

doi: [10.18751/PMCH/TR/283.HagelklimaSchweiz/1.0](https://doi.org/10.18751/PMCH/TR/283.HagelklimaSchweiz/1.0)

Fachbericht MeteoSchweiz Nr. 283

Erstausgabe: 2022

## Hagelklima Schweiz: Daten, Ergebnisse und Dokumentation

Katharina Schröder, Simona Trefalt, Alessandro Hering, Urs Germann, Cornelia Schwierz

### Empfohlene Zitierweise:

Schröder, K., Trefalt, S., Hering, A. Germann, U., Schwierz, C.: 2022, Hagelklima Schweiz: Daten, Ergebnisse und Dokumentation, *Fachbericht MeteoSchweiz*, 283, 82 pp., doi: [10.18751/PMCH/TR/283.HagelklimaSchweiz/1.0](https://doi.org/10.18751/PMCH/TR/283.HagelklimaSchweiz/1.0)

### Herausgeber:

Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie, MeteoSchweiz, © 2022

### MeteoSchweiz

Operation Center 1  
8058 Zürich-Flughafen  
T +41 58 460 91 11  
[www.meteoswiss.ch](http://www.meteoswiss.ch)



## Zusammenfassung

Im Projekt «Hagelklima Schweiz» (2018-2021) hat MeteoSchweiz in Zusammenarbeit mit Partnern verschiedener betroffener Sektoren neue Produkte zur Abschätzung der Hagelgefährdung in der Schweiz erstellt. Mithilfe einer neuen, umfassend qualitätsgeprüften und reprozessierten Version der MeteoSchweiz Radarhageldaten wurden Gitterkarten und Zeitreihen der aufgetretenen Hageltage und Hagelkorngrössen in der Schweiz erstellt. Die Daten umfassen einen Zeitraum von 20 Jahren (2002–2021). Die monatlichen und jährlichen Klimagitterkarten werden regelmässig aufdatiert und der Öffentlichkeit zur freien Nutzung zur Verfügung gestellt. Die klimatologischen Produkte der Radarmessungen werden durch Karten der lokalen Wiederkehrwerte von Hagelkorngrössen für verschiedene Wiederkehrperioden ergänzt. Da die Beobachtungsperiode aus klimatologischer Sicht kurz ist, ist die Berechnung von Wiederkehrperioden mit Unsicherheiten verbunden. Im Forschungsteil des Projektes wurde ein wahrscheinlichkeitsbasierter Resampling-Ansatz entwickelt. Dieser erlaubt es, durch stochastische Vervielfältigung von hochaufgelösten, einzeln isolierten Hagelzug-Ereignissen die Wiederkehrwerte von Hagelkorngrössen innerhalb der Schweizer Radardomäne für verschiedene Wiederkehrperioden zu berechnen und so eine Gefährdungsabschätzung bereitzustellen.

Die neue Hagelklimatologie zeigt, dass schweizweit durchschnittlich an über 30 Tagen im Jahr mit Hagel zu rechnen ist. Die Regionen des südlichen Tessin, das Emmental, Entlebuch und die Napfregion im zentralen Mittelland sowie der Jurabogen sind mit bis über drei Hageltagen pro Ort und Jahr besonders betroffen. Die Hauptsaison für Hagel liegt in den Monaten Mai bis August, mit grossen Schwankungen der Saisonalität zwischen den Jahren. Auch die Hagelaktivität zeigt grosse interannuelle Variabilität, besonders hagelreiche Jahre stehen hagelärmeren Jahren gegenüber. Die langjährige Gefährdungsabschätzung zeigt, dass in den Hagel-Hotspots der Schweiz alle zwei Jahre maximale Hagelkorngrössen von 2-3 cm möglich sind, alle 50 Jahre werden 5-6 cm erwartet. Der vorliegende Fachbericht beschreibt die neuen Hagelklima-Produkte und die Radarhagelprodukte des Schweizer Wetterradarnetzes, die der Hagelklimatologie zugrundeliegen. Er stellt einen Leitfaden zur Interpretation der Produktpalette dar und liefert allgemein verständliche Antworten auf die häufigsten Fragen zur Verwendung der neuen Hagelklimatologie.

# Inhalt

<b>Zusammenfassung</b>	<b>5</b>
<b>1</b>	<b>MeteoSchweiz Radarhagelraten</b> <b>8</b>
1.1	Hagelwahrscheinlichkeit - das Radarprodukt «POH» . . . . . 8
1.1.1	Wie errechnet sich die Hagelwahrscheinlichkeit POH? . . . . . 8
1.2	Maximale Hagelkorngrösse - das Radarprodukt «MESHS» . . . . . 9
<b>2</b>	<b>Qualität und Verfügbarkeit der Radarhagelraten</b> <b>10</b>
2.1	Wie tasten die Wetterradare der MeteoSchweiz die Atmosphäre ab? . . . . . 10
2.2	Wie hoch ist die Verfügbarkeit der Radardaten seit 2002 bis heute? . . . . . 11
2.3	Welche Qualitätsprüfungen und Reprozessierungen wurden angewendet? . . . . . 11
2.4	Hat sich die Qualität von POH und MESHS seit den ersten Daten im Jahr 2002 bis heute verändert? . . . . . 12
2.5	Hängt die Qualität von POH und MESHS von der Region ab? . . . . . 13
2.5.1	Wird die Qualität von POH und MESHS durch die Abschattung des Radarsignales an den Bergen beeinträchtigt? . . . . . 14
<b>3</b>	<b>Hagel-Korngrössen-Verteilungen</b> <b>15</b>
3.1	Die Rechenvorschrift «LEHA» . . . . . 16
3.1.1	Worauf basiert LEHA? . . . . . 17
3.2	Anwendung von MESHS, LEHA, und POH . . . . . 18
3.2.1	Soll ich LEHA, MESHS oder POH verwenden? . . . . . 18
3.2.2	Punktgenaue Vergleiche . . . . . 20
3.2.3	Punktgenauer oder aggregierter Vergleich? . . . . . 21
3.2.4	Beispiel eines Vergleiches mit aggregierten Daten . . . . . 21
3.2.5	Vergleich von MESHS und App-Hagelmeldungen . . . . . 23
3.2.6	Neue Vergleichsmöglichkeiten: 80 automatische Hagelsensoren . . . . . 24
<b>4</b>	<b>Hagelklimatologie: Hageltage und Hagelkorngrössen in der Schweiz</b> <b>26</b>
4.1	Übersicht der Verfügbarkeit der Daten . . . . . 26
4.2	Klimatologie der Hagelereignisse in der Schweiz . . . . . 27
4.2.1	Wie ist ein Hageltag (Hagelereignis) definiert? . . . . . 27
4.2.2	Klimatologie der Hageltage: Wie häufig kommt Hagel in der Schweiz vor? . . . . . 29
4.2.3	Jährliche und monatliche Hageltage seit April 2002 . . . . . 32
4.3	Hagelkorngrössen MESHS . . . . . 38
4.3.1	Grösste beobachtete Hagelkorngrössen . . . . . 40
4.3.1.1	Radarmessungen seit 2002 . . . . . 40
4.3.1.2	Grosse historische Hagelkorngrössen in der Schweiz und weltweit . . . . . 41
<b>5</b>	<b>Karten der Wiederkehrwerte</b> <b>43</b>
5.1	Wie interpretiert man Wiederkehrperioden? . . . . . 44
5.2	Wiederkehrwerte der Hagelkorngrössen MESHS . . . . . 44
5.2.1	Mit welchen Unsicherheiten sind die Wiederkehrwerte behaftet? . . . . . 46

5.2.2	Besonderheiten der «Gefährdungskarten Gebäudeschutz» basierend auf der Hagelkorngrosse LEHA . . . . .	47
5.3	Wie wurden die Wiederkehrperioden berechnet? . . . . .	49
5.3.1	Erstellung hochaufgelöster Footprints aller beobachteten Hagelgewitter seit 2002 . . . . .	52
5.3.2	Modellierung der täglichen Anzahl Hagelgewitter . . . . .	55
5.3.3	Auswahl der Wetterklassen und Anzahl der Hagelgewitter je Wetterklasse . . . . .	56
5.3.4	Räumliche Entstehungswahrscheinlichkeiten und Hagelgewitter-Regionen . . . . .	58
5.3.5	Erstellen der Karten der Wiederkehrwerte . . . . .	60
5.4	Evaluierung der Resampling Ergebnisse . . . . .	61
5.4.1	Vergleich mit Auswertungen historischer Hagelereignisse seit 1800 . . . . .	68
<b>6</b>	<b>Fazit</b>	<b>69</b>
	<b>Danksagung</b>	<b>70</b>
	<b>Anhang</b>	<b>71</b>
	<b>Abkürzungen</b>	<b>72</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>73</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>78</b>
	<b>Referenzen</b>	<b>79</b>

# 1 MeteoSchweiz Radarhageldaten

Die MeteoSchweiz Radarhageldaten umfassen die beiden operationellen Wetterradar-Hagel-Algorithmen «Probability of Hail» (POH) und «Maximum Expected Severe Hail Size» (MESHS), welche im Folgenden vorgestellt werden. Grundlagen für die Algorithmen sind die Arbeiten von *Waldvogel et al.* (1979); *Treloar* (1998), technische Details der Algorithmen werden in *Nisi et al.* (2016) beschrieben.

## 1.1 Hagelwahrscheinlichkeit - das Radarprodukt «POH»

Das Radarprodukt «POH» macht eine Angabe zur Wahrscheinlichkeit, am Boden Hagel irgendeiner Grösse über 5 Millimeter aufzufinden. Die Abkürzung «POH» steht für «Probability of Hail», auf Deutsch Hagelwahrscheinlichkeit. Die Werte reichen von 0 bis 100 Prozent. POH basiert auf Radarmessungen und der Temperaturschichtung der Atmosphäre. Genauer gesagt wird das sogenannte 45 dBZ-EchoTop verwendet, also die maximale Höhe, auf der die Radarreflektivität 45 dBZ erreicht. Diese wird in Relation gesetzt zur Höhe der Nullgradgrenze in der Umgebung. Das EchoTop beschreibt die Mächtigkeit der Gewitterwolke und damit auch die Stärke der Aufwinde. Die Nullgradgrenze setzt die untere Grenze, ab der Hagel wachsen kann. Die Kombination der beiden erlaubt eine empirische Schätzung der Hagelwahrscheinlichkeit. MeteoSchweiz erzeugt POH flächendeckend über der ganzen Schweiz und dem angrenzenden Ausland mit einer Maschenweite von 1 Kilometer und einer zeitlichen Auflösung von 5 Minuten. Das Radarprodukt POH ist bereits eine Minute nach der Radarmessung verfügbar. POH wird jeweils um Mitternacht und morgens um 6 Uhr UTC auch als Tagesprodukt erzeugt und zeigt dann für jeden Gitterpunkt mit Maschenweite von 1 Kilometer den maximalen Wert der vergangenen 24 Stunden. Die Maschenweite von 1 Kilometer leitet sich ab aus der effektiven räumlichen Auflösung der Radarmessung. Als Tagesprodukt wird POH oft verwendet, um einen Überblick zu erhalten, wo an einem Tag wahrscheinlich Hagel gefallen ist. Daraus lässt sich abschätzen, wo eventuell mit Schäden zu rechnen ist. Erfahrungsgemäss treten ab POH-Werten von 80% oder 90% verbreitet Schäden an Fahrzeugen auf. In der Landwirtschaft und vereinzelt auch an Fahrzeugen und Gebäuden werden Schäden auch bei tieferen POH-Werten beobachtet. Schäden hängen neben dem Vorhandensein von Gebäuden, Fahrzeugen und landwirtschaftlichen Kulturen und deren Verletzlichkeit auch von der Korngrösse ab. Daher empfiehlt es sich, auch das Radarprodukt MESHS (Kapitel 1.2) und die daraus abgeleitete Grösse LEHA (Kapitel 3.1) beizuziehen.

### 1.1.1 Wie errechnet sich die Hagelwahrscheinlichkeit POH?

Hagelkörner wachsen bevorzugt innerhalb einer bestimmten Schicht in der Gewitterwolke. Diese wird unten durch die Nullgradgrenze begrenzt. Die obere Begrenzung ist nicht scharf, aber das sogenannte 45 dBZ-EchoTop, also die maximale Höhe, bei der die Radarreflektivität 45 dBZ erreicht, ist erfahrungs-

gemäss ein guter Indikator. Je mächtiger diese Schicht, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass innerhalb der Gewitterwolke Hagel entsteht. Die Nullgradgrenze befindet sich in den Hagelmonaten April-August vorwiegend zwischen 2500 und 4000 Metern über Meer. Das 45 dBZ-EchoTop erreicht in starken Gewittern oft Höhen zwischen 6 und 10 Kilometern über Meer, gelegentlich auch höher. Die POH-Werte errechnen sich aus der Mächtigkeit dieser Schicht. Ist diese Schicht weniger als 1,65 Kilometer mächtig, resultiert ein POH-Wert von 0%. Das heisst, die Entstehung von Hagel kann praktisch ausgeschlossen werden. Ab einer Mächtigkeit von 5,5 Kilometern erreicht POH den maximalen Wert von 100%. Bei gleichbleibender Höhe der Nullgradgrenze und einem Wachstum der Gewitterwolke und damit auch des EchoTops um 100 Meter nimmt der POH-Wert zwischen 1 und 5 Prozentpunkten zu. Der Wert der Zunahme hängt von der absoluten Höhe der Nullgradgrenze ab. In der Regel verändert sich die Höhe der Nullgradgrenze kaum innerhalb des Lebenszyklus eines Gewitters, aber das Echo-Top und somit auch die POH-Werte können im Bereich von einigen Minuten stark zu- und abnehmen. Das POH Radarprodukt bildet diese Veränderungen mit der hohen zeitlichen Auflösung von 5 Minuten gut ab.

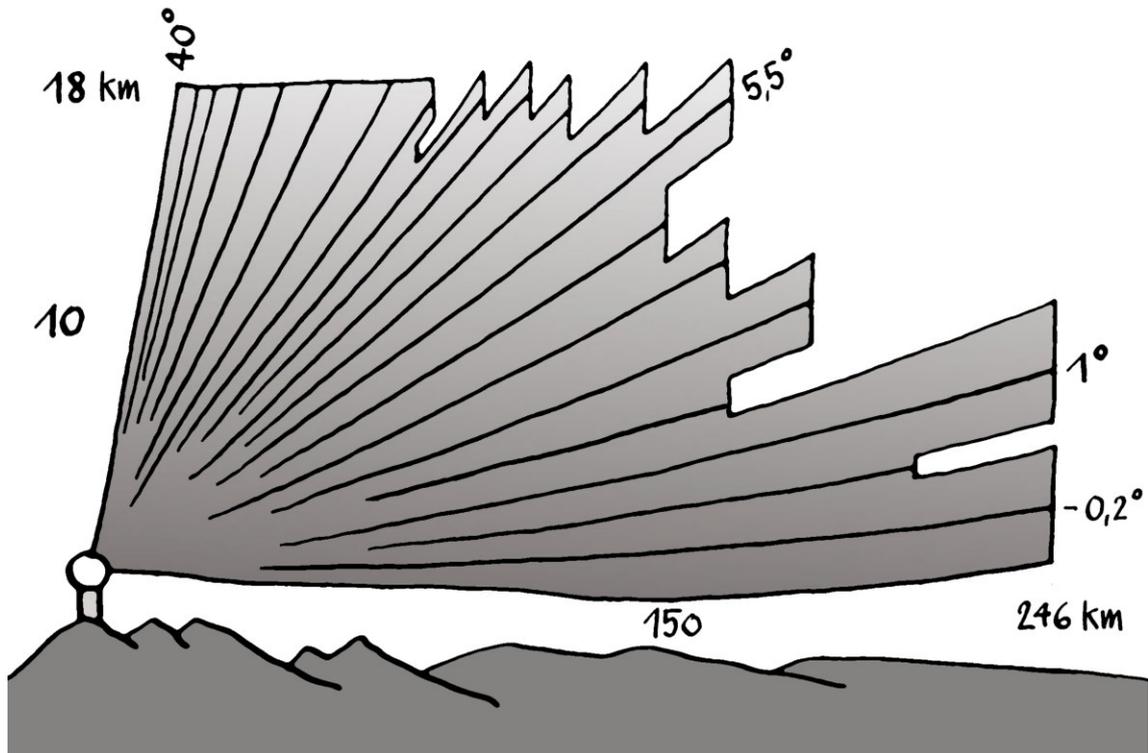
## **1.2 Maximale Hagelkorngrösse - das Radarprodukt «MESHS»**

Das Radarprodukt «MESHS» gibt eine Grössenordnung des Durchmessers des grössten am Boden aufprallenden Hagelkornes an, welches auf Grund der Radarmessungen und der Temperaturschichtung in der Atmosphäre denkbar ist. Die Abkürzung «MESHS» steht für «Maximum Expected Severe Hail Size», auf Deutsch «Maximale erwartete Hagelkorngrösse». Dieses maximale Korn muss aber nicht zwingend vorkommen. MESHS ist eine Schätzung, bis zu welcher Grösse ein Hagelkorn in der beobachteten Gewitterwolke wachsen kann. MESHS basiert, ähnlich wie POH, auf dem EchoTop aus den dreidimensionalen Messungen der Wetterradare, der Höhe der Nullgradgrenze aus den Temperaturdaten des Wettermodells und den physikalischen Kenntnissen über die Entstehung von Hagel. Bei MESHS wird das 50 dBZ-EchoTop verwendet. MESHS beschränkt sich auf Hagelkorngrössen ab 2 Zentimetern, wohingegen POH auch Flächen für kleineren Hagel ausweist. Deswegen ist die räumliche Ausdehnung der Region mit MESHS-Werten oft viel kleiner als die der Region mit POH-Werten. Über 6 Zentimetern wird MESHS meist nicht mehr differenziert. Dies ist darin begründet, dass für sehr grosse Korngrössen noch wenige Bodenreferenzdaten zur Verfügung stehen und daher die Ableitung der Korngrössen noch nicht verlässlich möglich ist. Analog zu POH errechnet MeteoSchweiz auch MESHS flächendeckend über der Schweiz und dem angrenzenden Ausland mit einer Maschenweite von 1 Kilometer und einer zeitlichen Auflösung von 5 Minuten. MESHS steht bereits eine Minute nach der Radarmessung zur Verfügung. Es wird auch jeweils um Mitternacht und morgens um 6 Uhr UTC als Tagesprodukt erzeugt und zeigt dann für jeden Gitterpunkt mit Maschenweite von 1 Kilometer den über 24 Stunden maximal aufgetretenen Wert an. Dass ein Hagelkorn von der Grösse MESHS innerhalb des betroffenen Quadratkilometers am Boden von einer Person gefunden wird, dürfte nur selten vorkommen. Erstens wird dieser maximal denkbare Durchmesser in der Realität oft nicht oder nur knapp erreicht. Zweitens ist die Wahrscheinlichkeit klein, dass eine Person genau dieses Korn findet, bevor es schmilzt.

## 2 Qualität und Verfügbarkeit der Radarhageldaten

### 2.1 Wie tasten die Wetterradare der MeteoSchweiz die Atmosphäre ab?

Für die landesweite Erfassung von Niederschlagsfronten, Schauern, Schneefällen, Gewittern und Hagelzellen muss der Wetterradar die Atmosphäre mit hoher Auflösung in allen vier Dimensionen in Raum und Zeit abtasten, insbesondere in einem Alpenland wie der Schweiz, wo das Signal der Radare bei den tiefen Elevationswinkeln teilweise durch die Berge abgeschattet wird. Die Antenne der Radare ist in der Schweiz so programmiert, dass sie alle 5 Minuten 20 volle Umdrehungen auf 20 verschiedenen Elevationswinkeln vollzieht (vgl. Abbildung 1). Die tiefste Elevation liegt bei minus 0.2 Grad, also knapp unter dem Horizont und dient insbesondere für die Erfassung von Niederschlägen bis zur maximalen Distanz von 246 Kilometern. Für die Erfassung von hochreichenden Gewitterwolken werden die Radardaten meist bis zu einer maximalen Distanz von 160 km verwendet. Die höchste Elevation liegt bei 40 Grad. Die 20 Umdrehungen bei verschiedenen Elevationen erlauben eine fein-skalige Erfassung der vertikalen Struktur der Gewitter, einer für die Ableitung der Hagelprodukte POH und MESHS unabdingbaren Voraussetzung. Da sich Gewitter und Hagelzellen im Zeitraum von einigen Minuten wesentlich verändern können, muss die Abtastung der 20 Elevationen schnell erfolgen. Die von der MeteoSchweiz gewählte Abtastung von 20 Elevationen in nur 5 Minuten stellt hohe Anforderungen an die Antennenmechanik. Es gibt weltweit nur wenige operationelle Radare, welche so hochaufgelöst abtasten. Nur eine gleichzeitig in Raum und Zeit hohe Abtastdichte erlaubt es in einem Alpenland, zuverlässige Messungen für die Warnungen vor Starkniederschlägen, Gewittern, Sturzfluten und Hagel zu erhalten. Die verzahnte Abtastung mit je 10 Elevationen alle 2.5 Minuten ermöglicht es überdies, gewisse Radarprodukte im 2.5 Minutentakt zu aktualisieren. Für weitere Details siehe auch die Publikationen von *Germann et al.* (2015, 2016, 2017, 2022).



**Abbildung 1:** Die Antenne der MeteoSchweiz Radare vollzieht alle 5 Minuten 20 volle Umdrehungen bei Elevationswinkeln zwischen minus 0.2 und plus 40 Grad. Die Krümmung der Radarkeulen ist eine Folge der Erdkrümmung und der Beugung der Radarwelle in der Atmosphäre. Auf den tiefsten drei Elevationen -0.2, 0.4 und 1.0 Grad werden Echos bis zu Distanzen von 246 Kilometern erfasst und ausgewertet, bei den höheren Elevationswinkeln bis etwas mehr als 150 km, respektive bis zu einer Höhe von 18 km. Eine zuverlässige Ableitung der Hagelgrößen POH und MESHS ist bis 150 km Distanz möglich.

**Hinweis.** Weitere Informationen zum Schweizer Wetterradarnetz auf [www.meteoschweiz.admin.ch / Wetter / Messsysteme / Atmosphäre / Das Schweizer Wetterradarnetz](http://www.meteoschweiz.admin.ch/Wetter/Messsysteme/Atmosphäre/Das_Schweizer_Wetterradarnetz)

## 2.2 Wie hoch ist die Verfügbarkeit der Radardaten seit 2002 bis heute?

Die Verfügbarkeit der Radardaten ist für ein operationelles Radarnetzwerk im internationalen Vergleich sehr hoch (German et al., 2022). Artefakte und Lücken in den Radarmessungen sind selten. Beim Wechsel von der dritten zur vierten Radargeneration gab es baubedingte Unterbrüche der Radare Monte Lema, La Dôle und Albis von jeweils einigen Wochen. Dies betrifft den Juni 2011, den Oktober 2011 und den Juni 2012. Daraus resultiert eine vergleichsweise geringere Qualität der Radarkomposite in den genannten Monaten, sowie in den Jahresprodukten für 2011 und 2012.

## 2.3 Welche Qualitätsprüfungen und Reprozessierungen wurden angewendet?

Die Wetterradardaten der MeteoSchweiz genügen höchsten Qualitätsansprüchen. Vom Radarsignal bis zum Endprodukt durchlaufen die Daten umfassende Prozessierungsketten, welche ständig weiterentwickelt werden. Bei der statistischen Auswertung langer Datenreihen muss deshalb darauf geachtet

**Tabelle 1:** Reprozessierung und Qualitätskontrollen der Radarhageldaten für die klimatologischen Auswertungen

Schritt	Beschreibung	Ziel
Sensitivitätstest der EchoTop-Grenzwerte	Reprozessierung mit abgeänderten Schwellwerten	Testen der Sensitivität der Hagelalgorithmen
Glätten der Nullgradgrenze aus dem Wettervorhersagemodell	Glätten der Nullgradgrenze-Felder mithilfe eines 30-km disk-average-Filters (Flächenmittel über eine kreisförmige Fläche mit 30 km)	Vergleichbarkeit über die verschiedenen Modell-Versionen COSMO 7, 2, und 1
Artefakt-Entfernung	Entfernen seltener, nicht-meteorologischer Signale und Fehlwerte (z.B. Chaffs), welche in seltenen Einzelfällen zu Beginn der Beobachtungsperiode (2002-2011) auftraten.	Entfernen von seltenen nicht-meteorologischen Signalen
Entfernung Residual Clutter	Identifizierung und Entfernung vereinzelter Clutter-Pixel, die v.a. zu Beginn der Beobachtungsperiode (2002-2011) in den hochalpinen Gegenden auftraten	Entfernen von seltenen nicht-meteorologischen Signalen
Gewitter-Tracking Filter	Filtern der Radarhagelfelder mithilfe der Gewittertracking-Software der MeteoSchweiz: Nur Hagelsignale innerhalb detektierter Gewitterzellen werden berücksichtigt.	Entfernen von seltenen nicht-meteorologischen Signalen

werden, dass die analysierten Datenreihen über die Zeit in der Qualität vergleichbar sind. Für die klimatologischen Auswertungen wurden daher die Radarhageldaten vor allem der frühen Beobachtungsperiode nochmals umfassenden Qualitätskontrollen und einer Reprozessierung unterzogen. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die umgesetzten Schritte.

Für weitere Informationen zur Qualitätskontrolle und Reprozessierung wird auf den begleitenden Technischen Bericht (*Trefalt et al., 2022*) verwiesen.

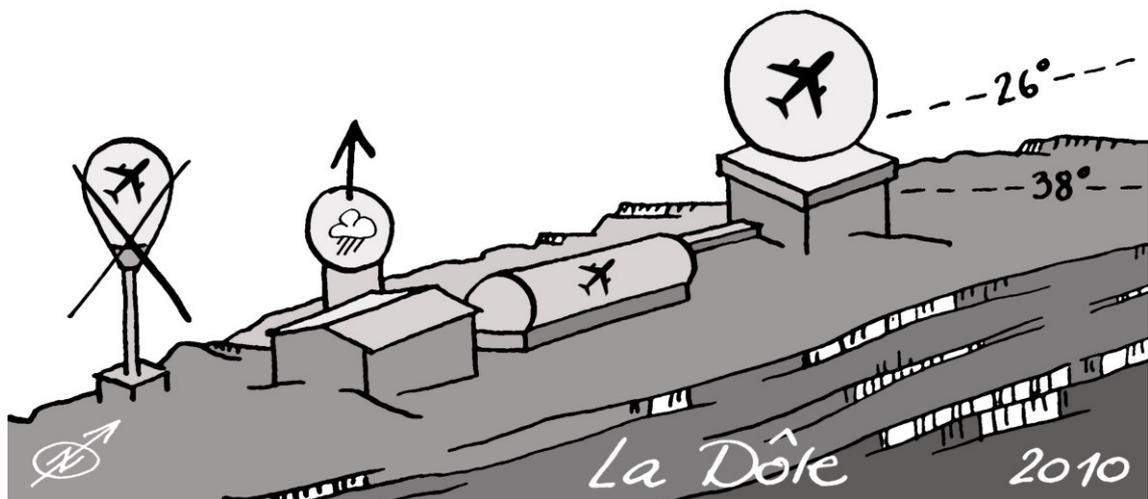
## 2.4 Hat sich die Qualität von POH und MESHS seit den ersten Daten im Jahr 2002 bis heute verändert?

Die Qualität aller Radarprodukte der MeteoSchweiz, inklusive POH und MESHS, ist insbesondere beim Wechsel zur vierten Radargeneration in den Jahren 2011/2012 markant gestiegen. Die Radarsysteme der aktuellen vierten Generation verfügen über doppelte Polarisation, was unter anderem das Identifizieren und Entfernen von Störsignalen vereinfacht. Des Weiteren wurden für die vierte Radargeneration 2014 und 2016 zwei zusätzliche Radarstationen auf der Pointe de la Plaine Morte, an der Grenze zwischen den Kantonen Wallis und Bern, und dem Weissfluhgipfel in Graubünden in Betrieb genommen. Zum einen ermöglichen diese zusätzlichen Radare eine bessere Abdeckung der inneralpinen Regionen, zum anderen garantieren sie eine schweizweite Abdeckung, falls eine der anderen Radarstationen ausfallen sollte. Ein Radarprodukt, welches gleichzeitig Messungen von mehreren Radarstationen integriert, wird «Komposit» genannt. Bei der Berechnung von POH und MESHS werden,

wie bei allen anderen Radarprodukten der MeteoSchweiz, für jeden Gitterpunkt mit Maschenweite von einem Kilometer stets alle über diesem Punkt zur Verfügung stehenden Radarmessungen berücksichtigt. Es handelt sich demzufolge um Kompositprodukte. Von 2002 bis 2014 waren die meisten Regionen in der Schweiz von zwei Radaren abgedeckt, nach 2014 von dreien.

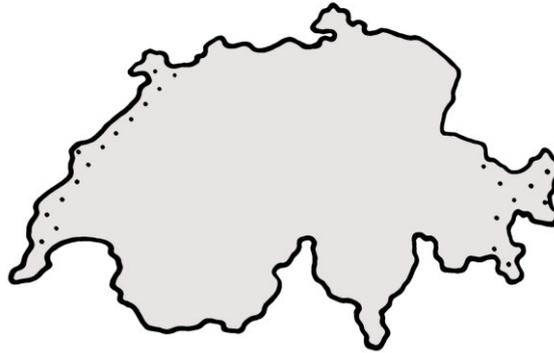
## 2.5 Hängt die Qualität von POH und MESHS von der Region ab?

Die Qualität von POH und MESHS ist über der ganzen Schweiz weitgehend homogen, nimmt aber im Ausland mit zunehmender Distanz von den Radarstationen rasch ab. Die Region mit der besten Radarabdeckung innerhalb der Schweiz liegt im Schweizer Mittelland und dem Südtessin. In einer kegelförmigen Region über dem Jura entlang der Grenze zu Frankreich wird die Messung etwas beeinträchtigt durch ein Gebäude der Flugsicherung in der Nähe der Radarstation auf La Dôle, welches den Radarstrahl bei tiefen Elevationswinkeln abschattet (siehe Abbildung 2 und 3). Dieser Kegel ist manchmal in den Karten der POH- und MESHS-Tagesmaxima zu erkennen, insbesondere dann, wenn Daten vieler Jahre integriert werden.



**Abbildung 2:** Auf La Dôle steht der Wetterradar der MeteoSchweiz in unmittelbarer Nähe von Flugsicherungsanlagen der skyguide. Die Zeichnung zeigt die Situation im 2010, vor der Erneuerung des Wetterradars im Projekt Rad4Alp im 2011. Bei tiefen Elevationswinkeln in den Richtungen Südwesten und Nordosten (Azimut  $26^\circ$  bis  $38^\circ$ ) wurde das Signal des Wetterradars durch Anlagen der Flugsicherung abgeschattet. Im Projekt Rad4Alp wurde die Antenne des Wetterradars um zwei Meter erhöht und das Hindernis im Südwesten abgebaut.

Des weiteren sind die POH- und MESHS-Werte ab einer Distanz von 150 km von den Radarstationen nur qualitativ zu verwenden, da in diesen Regionen die vertikale Dichte an Radarmessungen aus messtechnischen Gründen unzureichend ist. Dies kann gelegentlich in den Bildern der POH- und MESHS-Tagesmaxima anhand von bogenförmigen Strukturen über dem Ausland erkannt werden.



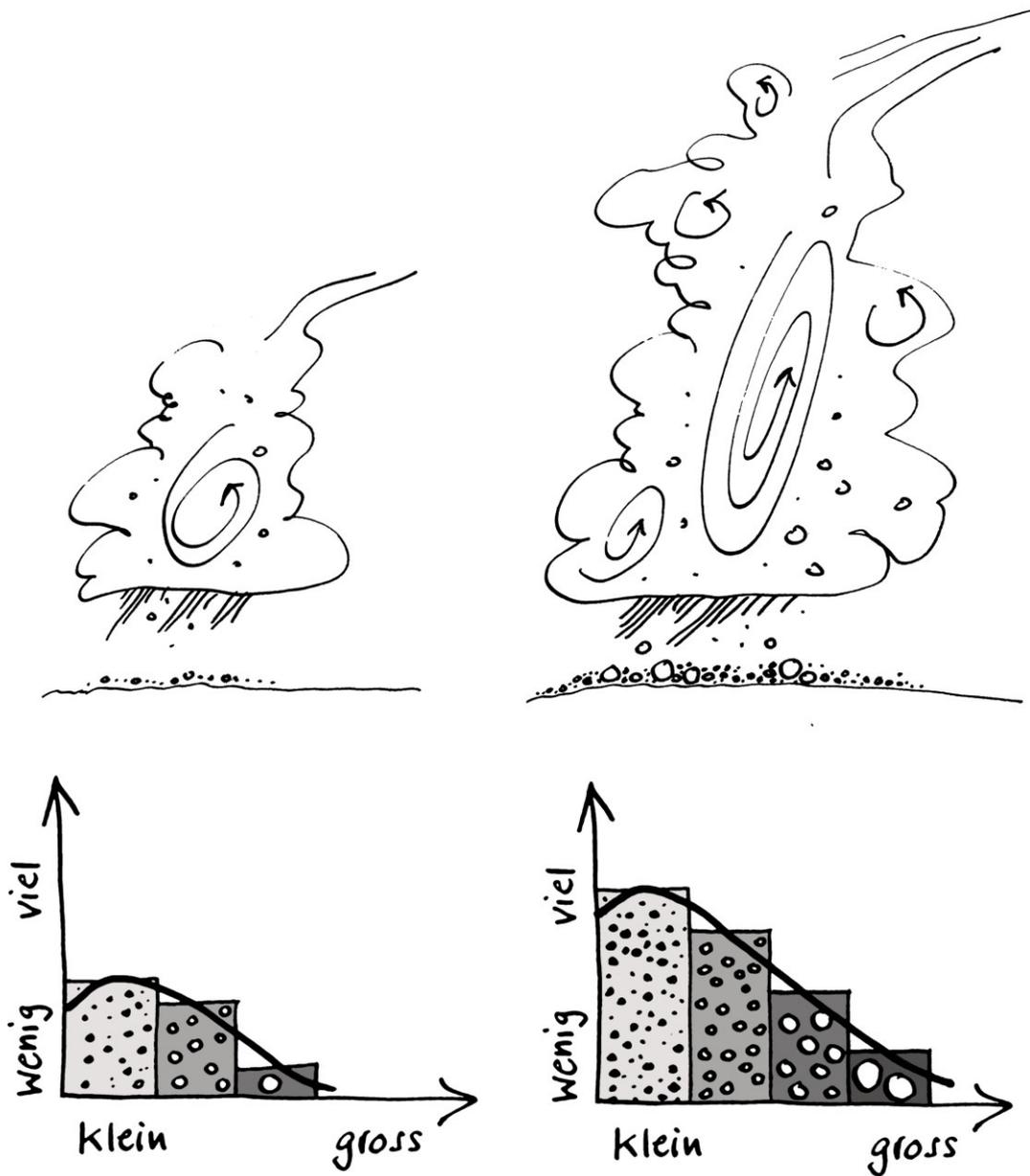
**Abbildung 3:** In zwei Regionen ist die Qualität der Radarhagelraten leicht tiefer als in der übrigen Schweiz: Auf La Dôle wird der Radarstrahl durch ein naheliegendes Gebäude in Richtung Nordosten teilweise abgeschattet. Als Folge davon können Hagelgewitter in einem schmalen Band entlang der französischen Grenze etwas weniger genau vermessen werden. Im östlichen Teil Graubündens ist die Qualität leicht tiefer wegen der zunehmenden Distanz zu den Radarstationen. Dies bezieht sich auf die Situation mit den drei Radaren Albis, La Dôle und Monte Lema. Mit der Erhöhung der Antenne des Wetterradars auf La Dôle (2011) und der Inbetriebnahme von zwei zusätzlichen Stationen auf der Pointe de la Plaine Morte (2014) und dem Weissfluhgipfel (2016) im Rahmen des Projektes Rad4Alp konnten diese Beeinträchtigungen weitgehend behoben werden.

### 2.5.1 Wird die Qualität von POH und MESHS durch die Abschattung des Radarsignales an den Bergen beeinträchtigt?

Die Abschattung des Radarsignales durch die Berge spielt bei der Berechnung von POH und MESHS keine wesentliche Rolle, da Gewitterwolken viele Kilometer mächtig sind und von den Schweizer Radarstationen auch über den Alpen gut detektiert werden.

## 3 Hagel-Korngrössen-Verteilungen

In mächtigen Gewitterwolken können Eispartikel in starken Aufwinden in Schwebelage gehalten oder viele Kilometer nach oben befördert werden. Dabei können sie durch das Auffangen von kleinen unterkühlten Wassertröpfchen oder das Anfrieren von Wasserdampf zu einem Eiskorn anwachsen, bis dieses schliesslich zu schwer ist, von den Aufwinden nicht mehr getragen wird und zu Boden fällt. Ein Eispartikel kann in der Gewitterwolke auch mehrere Zyklen durchlaufen, bevor es aus der Wolke fällt. Je nach Aufenthaltszeit und Menge unterkühlter Tröpfchen und Wasserdampf in der unmittelbaren Umgebung entstehen aus dem Eispartikel kleine, mittlere oder grosse Eiskörner. Ab einem Durchmesser von 5 Millimetern spricht man von Hagel. In einer Hagelwolke kommen gleichzeitig viele Hagelkörner verschiedenster Grössen vor. Wenn wir die Körner nach ihrer Grösse sortieren und zählen, erhalten wir eine sogenannte Korngrössenverteilung. Die Korngrössenverteilung von Hagel ist «schief», das heisst von den kleinen gibt es viele, von den grösseren nur wenige (siehe Abbildung 4).



**Abbildung 4:** Oben links ein Gewitter mit nur kleinen bis mittelgrossen Hagelkörnern. Oben rechts ein Gewitter, welches das Wachstum von Hagel stärker begünstigt und entsprechend auch grössere Hagelkörner hervorbringt. Unten die entsprechende Korngrößenverteilung.

### 3.1 Die Rechenvorschrift «LEHA»

LEHA ist eine aus dem Radarprodukt MESHS abgeleitete Hagelkorngrösse. Die Abkürzung «LEHA» steht für «Largest Expected Hailsize on a reference Area of a given size», auf Deutsch die «Grösste zu erwartende Hagelkorngrösse auf einer Referenzfläche von gegebener Grösse». Während MESHS sich auf eine Fläche eines Quadratkilometers bezieht, hat LEHA zum Ziel, das grösste Korn auf einer kleineren Skala abzuschätzen (Germann *et al.*, 2022). Nehmen wir beispielsweise die Fläche des

Daches eines Einfamilienhauses von 100 Quadratmetern; dies ist 10'000 mal kleiner als die Referenzfläche von MESHS. Da es von den grössten Hagelkörnern innerhalb des Quadratkilometers nur wenige gibt (siehe Abbildung 4), ist die Wahrscheinlichkeit klein, dass ein solches gerade auf das betrachtete Hausdach trifft. Das grösste Korn, welches wir auf dem Hausdach erwarten können, ist dementsprechend kleiner als MESHS. LEHA gibt eine Schätzung des Durchmessers der grössten Hagelkörner an, welche auf der kleineren Fläche zu «erwarten» sind. Die Ableitung von LEHA aus MESHS geschieht mit einer Rechenvorschrift, dem LEHA-Diagramm (Abbildung 5), und ist insbesondere für Anwendungen rund um Schäden an Gebäuden, Fahrzeugen und landwirtschaftlichen Kulturen relevant. LEHA bezieht sich jeweils auf eine Referenzfläche. «LEHA-100» beispielsweise bezieht sich auf eine Fläche von 100 Quadratmetern, also in etwa der Grösse eines Daches eines Einfamilienhauses. Natürlich kann im Extremfall ein Korn der Grösse MESHS auf ein Hausdach treffen, aber das wird nur sehr selten geschehen.

### 3.1.1 Worauf basiert LEHA?

Die LEHA Rechenvorschrift transformiert den Durchmesser des grösstmöglichen Hagelkornes innerhalb eines Quadratkilometers (MESHS) in die grösste zu erwartende Korngrösse auf einer kleineren Referenzfläche (LEHA). Die Rechenvorschrift basiert auf einer Vielzahl von Messungen von Korngrössen-Verteilungen in Hagelzellen in der Schweiz und im Ausland. Das sind insbesondere Messungen aus dem Hagel-Grossversuch IV, welcher in den 70er Jahren im Napfgebiet durchgeführt wurde, sowie erste Daten der automatischen Hagelsensoren, welche seit 2018 in der Schweiz im Einsatz sind. Aus den Messungen wurden statistische Modelle abgeleitet, welche die Form typischer Hagel-Korngrössen-Verteilungen in der Schweiz beschreiben. Diese wiederum bilden zusammen mit dem Radarprodukt MESHS die Grundlage für die LEHA Rechenvorschrift (Germann et al. 2022).

#### Die LEHA-Rechenvorschrift.

$$LEHA(s) \approx MESHS + 0.919 \log_{10}(s) \cdot MESHS + 0.0083976 \log_{10}(s)$$

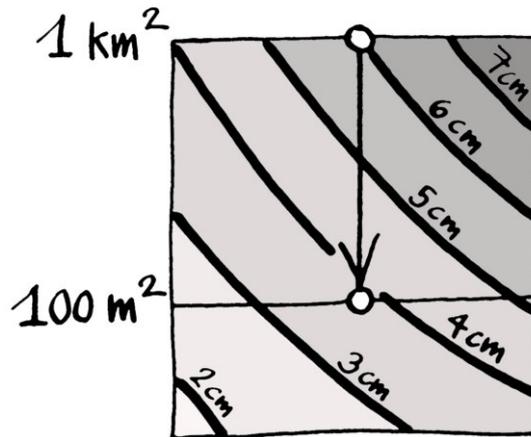
$s$ : Oberfläche (surface) in [km<sup>2</sup>],  $MESHS$ ,  $LEHA$ : Korngrösse in [mm]

#### Beispiel für eine Korngrösse von 4 cm MESHS und einer Referenzfläche von 100 m<sup>2</sup>:

$$MESHS = 4 \text{ cm} = 40 \text{ mm}$$

$$s = 100 \text{ m}^2 = 0.0001 \text{ km}^2$$

$$LEHA(0.0001 \text{ km}^2) \approx MESHS + 0.919 \log_{10}(0.0001 \text{ km}^2) \cdot MESHS + 0.0083976 \log_{10}(0.0001 \text{ km}^2) \approx 25.3 \text{ mm}$$

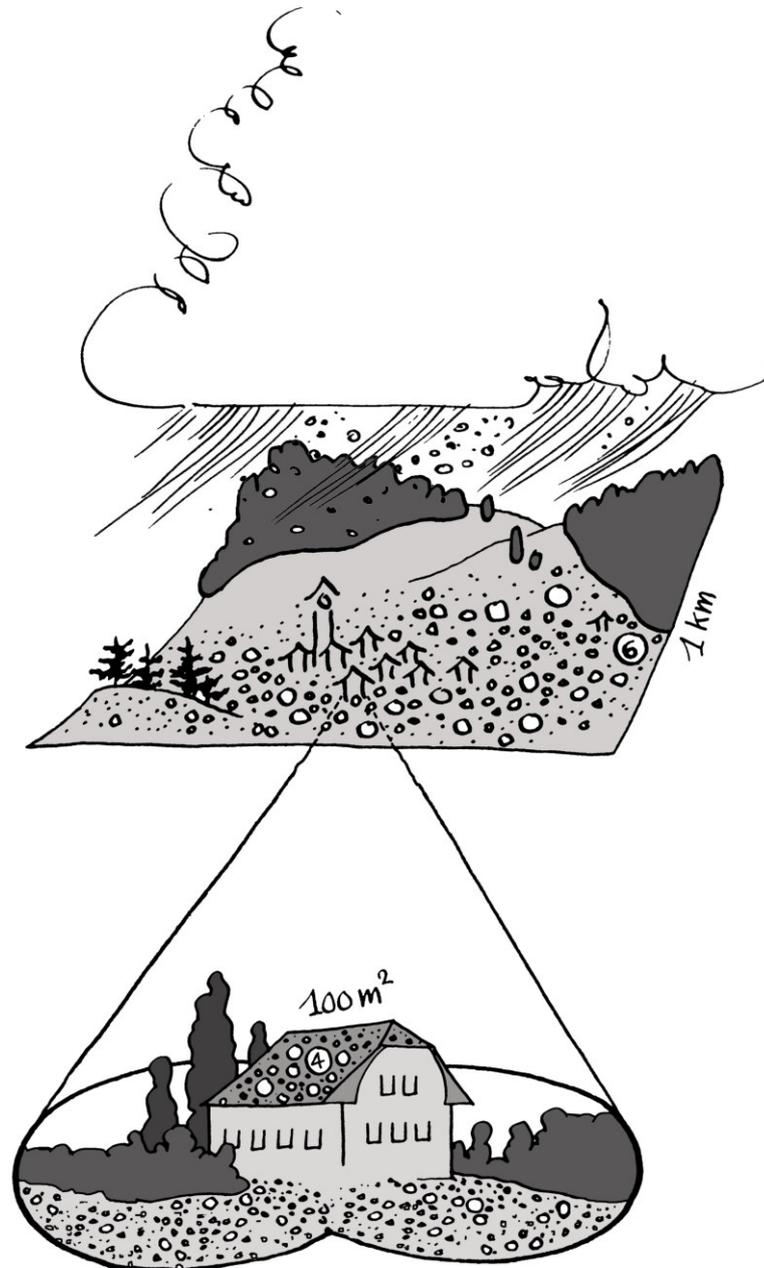


**Abbildung 5:** MESHWS gibt den Durchmesser des grösstmöglichen Hagelkornes innerhalb eines Quadratkilometers an. Das LEHA-Diagramm erlaubt die Transformation auf kleinere Referenzflächen. LEHA-100 beispielsweise gibt das grösste zu erwartende Korn auf einer Fläche von 100 Quadratmetern an. Für jeden MESHWS-Wert erhält man einen Wert für LEHA-100. Gehen wir als Beispiel von einem MESHWS-Wert von 6 Zentimetern aus. Daraus leitet sich ein LEHA-100-Wert von 3.8 cm, oder gerundet, 4 cm ab. Natürlich kann auf den 100 Quadratmetern auch das 6 Zentimeter Korn einschlagen, aber die Wahrscheinlichkeit dafür ist sehr klein.

## 3.2 Anwendung von MESHWS, LEHA, und POH

### 3.2.1 Soll ich LEHA, MESHWS oder POH verwenden?

Die Rechenvorschrift LEHA wurde entwickelt als Antwort auf Bedürfnisse aus der Praxis im Kontext der Schadensprävention, der Festlegung von Baunormen und der Versicherung von Gebäuden, Fahrzeugen und landwirtschaftlichen Kulturen. Als Referenzfläche wird standardmässig LEHA-100 berechnet. 100 Quadratmeter entsprechen in etwa der Grösse eines Einfamilienhauses (Abbildung 6). Aus meteorologischen Überlegungen dürfte LEHA-100 auch für Fahrzeuge eine passende Referenz sein. Die Berechnung von LEHA für Flächen kleiner als 100 Quadratmeter ist aus statistischen Überlegungen nicht sinnvoll. Für besondere Fragestellungen, bei denen es um einen maximal denkbaren Gebäude- oder Fahrzeugschaden geht, kann es von Nutzen sein, auch MESHWS beizuziehen, aber in den meisten Fällen werden Versicherer von Fahrzeugen und Gebäuden eher mit LEHA arbeiten. Auch für den Schaden an landwirtschaftlichen Kulturen ist die maximale Korngrösse weniger entscheidend. Falls es innerhalb eines Quadratkilometers Hagelkörner gibt, die den MESHWS Durchmesser erreichen, dann ist ihre Anzahl dennoch zu klein, um den Schaden wesentlich zu beeinflussen. In der Landwirtschaft hängt der Schaden an den Pflanzen stark von der vom Hagel betroffenen Kulturfläche, aber auch von der Dauer und der Intensität des Hagelschlages ab. Für die Bestimmung der betroffenen Fläche und der Dauer kann POH und ein geeigneter POH-Schwellenwert verwendet werden. LEHA-100 kann allenfalls beigezogen werden, um die Intensität des Hagelschlages näherungsweise zu charakterisieren. Der landwirtschaftliche Schaden hängt aber auch stark von nicht-meteorologischen Faktoren wie der Art der Kultur und der Wachstumsphase der Pflanzen ab.



**Abbildung 6:** Die Abbildung illustriert den Unterschied zwischen MESH und LEHA. Das Radarprodukt MESH gibt eine Grössenordnung des grössten Hagelkornes an, welches auf Grund der dreidimensionalen Radarmessungen und der Temperaturschichtung innerhalb eines Quadratkilometers denkbar ist. Es bezieht sich auf die Skala eines Quadratkilometers. Die Wahrscheinlichkeit, dass dieses grösste Korn innerhalb eines Quadratkilometers gerade auf ein Hausdach oder ein Fahrzeug fällt, ist klein. Deshalb wurde für Anwendungen rund um Hagelschäden an Gebäuden und Fahrzeugen die Grösse LEHA definiert, welche über eine Rechenvorschrift, dem LEHA-Diagramm, aus MESH abgeleitet wird. LEHA bezieht sich auf eine kleinere Skala, zum Beispiel ein Hausdach von 100 Quadratmetern (LEHA-100). LEHA-100 ist eine Schätzung des grössten Hagelkornes, welches auf einer Fläche von 100 Quadratmetern typischerweise zu erwarten ist. In der Abbildung hat das grösste Hagelkorn innerhalb des Quadratkilometers einen Durchmesser von 6 Zentimetern. Daraus leitet sich für LEHA-100 gemäss dem LEHA-Diagramm ein Durchmesser von 3.8 Zentimeter ab. In der Abbildung hier wurde der Wert auf 4 cm gerundet.

### 3.2.2 Punktgenaue Vergleiche

Wer für einen Hagelzug MESHS- oder LEHA-Werte punktgenau mit den am Boden beobachteten Hagelkörnern und erhobenen Schadensdaten vergleicht, wird keine perfekte Übereinstimmung finden. Das grösste am Boden gefundene Korn liegt vielleicht nicht in der Region mit den höchsten MESHS- und LEHA-Werten, und die räumliche Verteilung der Gebäudeschäden am Boden deckt sich nur beschränkt mit derjenigen von MESHS respektive LEHA-100. Wenn wir pixelweise jedem Gebäudeschaden den entsprechenden LEHA-100 Wert gegenüberstellen, erhalten wir eine grosse Streuung und oft nur eine schwache Korrelation.

Grund dafür sind die vielen Vereinfachungen, Annahmen und Unsicherheiten, die bei diesem «punktgenauen» Vergleich ins Spiel kommen. Wir haben in diesem Beispiel vier Typen von Daten: MESHS, LEHA, am Boden beobachtete Hagelkörner und Schadensdaten. Erstens werden beim Vergleich viele Annahmen und Vereinfachungen gemacht, zweitens sind die Daten aller vier Typen mit grösseren Unsicherheiten behaftet, und drittens sind die Beziehungen zwischen den vier Datentypen bei Weitem nicht perfekt.

Die Angabe des maximalen Durchmessers eines runden Hagelkornes, dem MESHS-Wert, ist nur eine grobe Annäherung an die komplexe Natur von Formen und Korngrössen-Verteilungen. Hagelkörner haben oft eine unregelmässige Form, die Radarmessungen sind mit Messungenauigkeiten behaftet, Hagelkörner werden beim Fallen durch den Wind horizontal verfrachtet und schmelzen je nach Lufttemperatur mehr oder weniger bevor sie am Boden aufprallen. MESHS ist zwar so konzipiert, dass es eine Schätzung der Korngrösse am Boden liefert. Aber das Schmelzen von Hagel und die Verfrachtung im Wind auf dem Weg von der Wolke zum Boden sowie die anderen erwähnten Prozesse führen trotzdem zu Unsicherheiten. Des Weiteren ist Hagel ein sehr kleinräumiges Phänomen, die Verteilung der Korngrössen kann innerhalb eines Quadratkilometers stark variieren, und die Annahme einer homogenen Verteilung trifft im Einzelfall nur grob zu. Bei der Ableitung von LEHA aus MESHS werden ebenfalls Annahmen getroffen. LEHA geht von einer Familie vordefinierter Korngrössen-Verteilungen aus. Diese Verteilungen wurden aus Messungen in Hagelgewittern in der Schweiz abgeleitet, können aber nicht alle Besonderheiten einzelner, sich stark unterscheidender Hagelgewitter korrekt wiedergeben.

Auch die Beobachtungen von Hagel am Boden sind meistens unzureichend. Um die Korngrössen eines Hagelzuges am Boden vernünftig zu erfassen, müssten Tausende von Beobachtern im Raum verteilt werden und sofort nach dem Fallen von Hagel die grössten Körner in ihrer Umgebung suchen, messen und melden. Idealerweise würden sie nicht nur das grösste Korn melden, sondern gleich die ganze Korngrössenverteilung. Falls die Körner eine elliptische Form haben, was häufig der Fall ist, wird der Beobachter wahrscheinlich den grössten Durchmesser melden, während MESHS und LEHA sich eher auf einen mittleren Durchmesser beziehen.

Auch die Schadensdaten sind mit Unsicherheiten behaftet. Bei Schäden an Fahrzeugen sind der Ort und der Zeitpunkt, an dem das Fahrzeug vom Hagel getroffen wurde, oft nicht oder nur grob bekannt. Bei Gebäudeschäden kann es beispielsweise vorkommen, dass Schäden von Ferienrückkehrern unbeabsichtigt falschen Hageltagen zugeordnet werden. Der gemeldete Schaden ist nur eine Schätzung des effektiven Schadens, und letzterer hängt nicht nur von der Grösse der Hagelkörner, sondern von vielen anderen Parametern wie beispielsweise dem Alter und dem Hagelwiderstand des Materials ab. Auch, ob es sich um einen ästhetischen oder einen funktionalen Schaden handelt, spielt eine Rolle. Dies ist nur eine exemplarische Aufzählung der vielen Annahmen, Vereinfachungen und Unsicherheiten, welche den punktgenauen Vergleich schwierig machen. Die Überlagerung all dieser Unsicherheiten

ten führt zur grossen Streuung, welche für punktgenaue Vergleiche typisch ist.

### 3.2.3 Punktgenauer oder aggregierter Vergleich?

Was können wir tun, wenn ein punktgenauer Vergleich offensichtlich mit grossen Unsicherheiten behaftet ist? Allgemein kann gesagt werden, dass es bei der Auswertung von MESHS und LEHA kaum Sinn macht, mit exakten Millimeter-Werten zu rechnen. Wegen der bekannten Unsicherheiten wird empfohlen, mit Klassenbreiten von 0.5 oder 1.0 Zentimetern zu arbeiten. Um den Einfluss der horizontalen Verfrachtung von Hagel im Wind zu reduzieren, empfiehlt es sich an Stelle eines einzelnen MESHS- oder LEHA-Pixels auch die Werte aus der unmittelbaren Umgebung einzubeziehen. Einige der Unsicherheiten werden kleiner, wenn die Daten in Zeit und Raum aggregiert werden, beispielsweise wenn LEHA-Werte, Hagelbeobachtungen und Gebäudeschäden vor dem Vergleich über den ganzen Hagelzug oder über mehrere Hageltage zusammengefasst werden, oder wenn in einer praktischen Anwendung klimatologische Hagelkarten verwendet werden. Wir vergleichen also nicht Punkt für Punkt einen MESHS- oder LEHA-Wert mit dem entsprechenden Hagelfund oder -schaden am Boden, sondern vergleichen jeweils Gruppen von Werten. Ob ein aggregierter Vergleich Sinn macht, auf welcher Skala die Aggregation erfolgen soll, oder ob trotz der Unsicherheiten ein punktgenauer Vergleich durchgeführt werden muss, hängt von der konkreten Anwendung und Fragestellung ab. Wird am punktgenauen Vergleich festgehalten, ist es unabdingbar die Unsicherheiten zu berücksichtigen und soweit möglich zu korrigieren.

### 3.2.4 Beispiel eines Vergleiches mit aggregierten Daten

Richtig verwendet, liefern POH, MESHS und LEHA wertvolle und einzigartige Informationen betreffend Ort, Zeit und Korngrösse von Hagel. Wir illustrieren anhand einiger Kennzahlen zweier Hagelzüge beispielhaft, wie MESHS- und LEHA-Werte mit gemeldeten Gebäudeschäden und Hagelfunden am Boden in aggregierter Form verglichen werden können. Das Beispiel basiert auf den Daten von zwei Hagelzügen, welche am 12/13. Juli 2011 über die Nordschweiz gezogen sind, siehe Abbildung 7. Die verwendeten Daten umfassen MESHS und daraus abgeleitete LEHA-Werte auf dem 1-Kilometer-Gitter, 70 Hagelbeobachtungen am Boden und 20'600 erfasste Gebäudeschäden aus dem Kanton Aargau. Es geht hier nicht um eine detaillierte, quantitative Analyse der Daten vom 12/13. Juli 2011, sondern um eine Illustration, wie die Daten interpretiert und welche Übereinstimmung erwartet werden können.

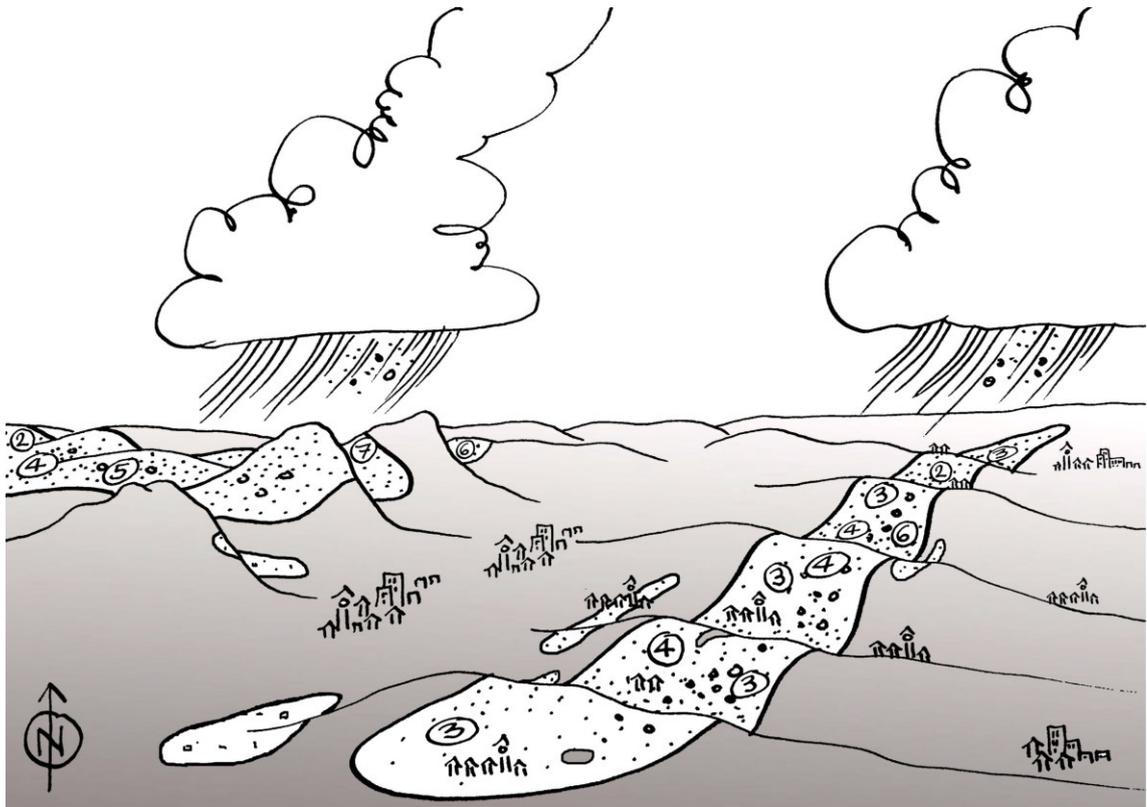
In einem ersten Schritt vergleichen wir die am Boden beobachteten Hageldurchmesser und Gebäudeschäden punktgenau mit den entsprechenden MESHS- oder LEHA-Werten. Wenn wir die Werte in einer Grafik einander gegenüberstellen, erhalten wir eine grosse Streuung und nur eine schwache Korrelation. Grund dafür sind die vielen bekannten Unsicherheiten, welche bei diesem punktgenauen Vergleich mitspielen, wie im vorangehenden Kapitel erläutert wurde.

Eine bessere Übereinstimmung erhalten wir, wenn wir die MESHS- und LEHA-Werte summarisch über eine Fläche zusammenfassen und als Gruppe mit den Hagelfunden und Gebäudeschäden vergleichen, wie es die folgenden Zahlen illustrieren. Im westlichen Hagelzug erreicht MESHS vereinzelt Werte bis 7 Zentimeter und über grössere Gebiete Werte von 5 bis 6 Zentimeter. Das grösste am Boden von einem «Storm Chaser» gefundene Hagelkorn ist elliptisch, der Durchmesser entlang der längeren Achse beträgt 6.7 Zentimeter, entlang der kürzeren Achse geschätzt zwischen 4 und 5 Zentimeter. Aus demselben Hagelzug gibt es weitere beachtenswerte Meldungen: zwei Mal 5.5, zwei Mal

5.4, drei Mal 4.0, zwei Mal 3.0, sowie einige Meldungen kleiner 3 Zentimeter. Diese Hagelfunde passen gut zu den erwähnten MESHS-Werten des Hagelzuges.

Für den östlichen Hagelzug, der von Zofingen bis in die Region von Winterthur zog, liegen aus dem Kanton Aargau Daten von Gebäudeschäden vor. Vereinzelt erreicht MESHS im östlichen Hagelzug Werte bis 10 Zentimeter, typische Werte entlang der Achse des Hagelzuges liegen im Bereich von 4 bis 6.5 Zentimeter. Die daraus abgeleiteten typischen LEHA-100-Werte betragen 2.5 bis 4 Zentimeter. Das heisst, wir erwarten, dass entlang der Achse des östlichen Hagelzuges verbreitet Hagelkörner dieser Grösse auf Gebäuden aufschlugen und Schäden verursachten. In der Tat wurden in den Siedlungsgebieten innerhalb des Hagelzuges verbreitet Korndurchmesser von 3 und 4 Zentimetern gemeldet. Es wurde auch ein einzelnes Korn von der Grösse 6 Zentimeter gemeldet. Die verbreitet gemeldeten Körner von 3 und 4 Zentimetern stimmen gut mit den oben erwähnten LEHA-100 Werten zwischen 2.5 und 4 Zentimetern überein. Der einzelne Fund des 6 Zentimeter Kornes bestätigt die Aussage, dass im Einzelfall auch ein Korn grösser LEHA-100 auftreten kann. Allein im Kanton Aargau wurden 20'600 Gebäudeschäden erfasst, welche in der räumlichen Verteilung und den Schadenssummen gut zu den LEHA-100-Werten zwischen 2.5 und 4 Zentimetern passen. Die MESHS-Maxima bis 10 Zentimeter wurden vermutlich in der Realität nicht erreicht, sonst gäbe es mit guter Wahrscheinlichkeit zumindest einige Funde grösser als 6 Zentimeter, aber ganz ausschliessen können wir das nicht.

*Quelle der Daten: Gebäudeschäden von der Gebäudeversicherung Kanton Aargau; Hagelfunde aus dem Sturmforum; Radarhageldaten MESHS und LEHA von der MeteoSchweiz; Auswertung von der Präventionsstiftung der Kantonalen Gebäudeversicherungen PS.*



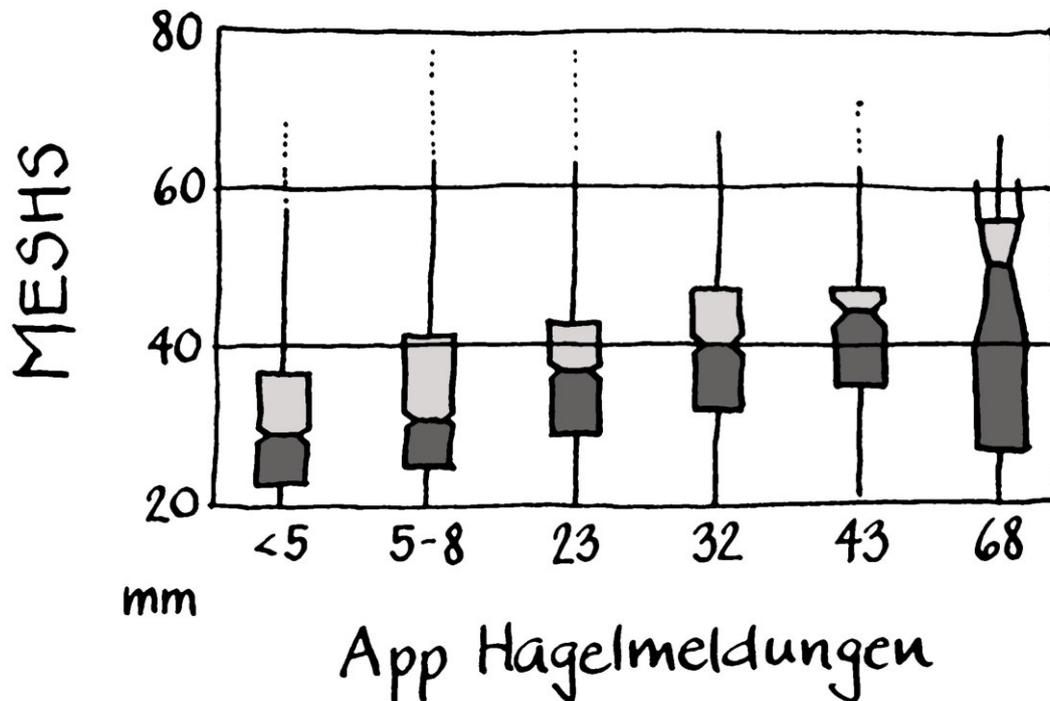
**Abbildung 7:** Die Zeichnung zeigt vereinfacht und mit überhöhtem Relief zwei Hagelzüge vom 12./13. Juli 2011. Weiss eingezeichnet die Flächen, welche gemäss Radar von Hagel betroffen waren. Der westliche Hagelzug hatte seinen Anfang in der Region von Delémont (ausserhalb der Zeichnung), zog nach Osten und endete am Bözberg. Der etwas östlicher gelegene Hagelzug startete bei Zofingen, zog Richtung Ostnordosten und hinterliess einen langen Hagelteppich, der sich bis in die Region von Winterthur zog. Die Zahlen geben zur Illustration die Korngrösse in Zentimetern einiger ausgewählter Hagelfunde am Boden an.

### 3.2.5 Vergleich von MESHS und App-Hagelmeldungen

2015 hat die MeteoSchweiz in der App eine Funktion für Hagelmeldungen eingeführt, einer Form von «crowdsourcing». Wer Hagel am Boden beobachtet, kann dies in der App unter Angabe von Korngrösse, Zeit und Ort melden. Für die Angabe der Korngrösse gibt es folgende Auswahl: kleiner als eine Kaffeebohne, Kaffeebohne (5-8 mm), Einfränkler (23 mm), Fünfliber (32 mm), Golfball (43 mm) und Tennisball (68 mm). Es gibt auch die Möglichkeit «Kein Hagel» zu melden, eine für wissenschaftliche Studien interessante Zusatzinformation. Die Hagelmeldefunktion erfreut sich grosser Beliebtheit. Dank der vielen Meldungen kann über die App zeitnah verfolgt werden, wo es gerade hagelt. Überdies bilden die Meldungen eine einzigartige Datenbasis für die Wissenschaft, insbesondere zur Verifikation von MESHS. Bis 2020 sind 119'000 Hagel-Meldungen eingegangen. Unter Ausschluss der «Kein Hagel»-Meldungen sind es 66'000, nach einer rigorosen Qualitätsfilterung verbleiben 41'000.

Die Qualität einer einzelnen crowdsourcing-Beobachtung kann nicht mit derjenigen einer Messung einer kalibrierten meteorologischen Station verglichen werden. Wenn die Meldungen einzeln mit den MESHS-Werten des entsprechenden Radarpixels verglichen werden, erhält man wegen der Überlagerung der Unsicherheiten in beiden Datentypen eine grosse Streuung. Aggregiert über den ganzen

Datensatz zeigt der Vergleich aber eine eindeutige Beziehung zwischen MESHS und den Hagelmeldungen aus der App (*Barras et al.*, 2019). Wie in der aus dieser Publikation abgeleiteten Abbildung 8 ersichtlich wird, werden in Regionen mit tiefen MESHS-Werten eher kleine Korngrößen gemeldet, in Regionen mit hohen MESHS-Werten grösserer Hagel.



**Abbildung 8:** Vergleich der über die App gemeldeten Korngrößen (crowdsourcing) mit den entsprechenden MESHS-Werten der Jahre 2018-2020. Die Balken zeigen für jede App-Korngrößenklasse die Verteilung der entsprechenden MESHS-Werte in der Form eines sogenannten Boxplots. Eine ausführliche Beschreibung der Daten, Methoden und Resultate findet sich in der Publikation von *Barras et al.* (2019). Die grösste Klasse der 68er muss mit Vorsicht interpretiert werden; es sind nur gerade 17 Datenpunkte und sie enthält trotz Qualitätsfilterung allenfalls noch vereinzelte Jux-Meldungen. Für weitere Angaben und Analysen wird auf die Masterarbeit von *Noti* (2016), die Publikationen von *Barras et al.* (2019) und *Trefalt et al.* (2018) sowie die Dissertation von *Hélène Barras* (*Barras*, 2021) verwiesen

### 3.2.6 Neue Vergleichsmöglichkeiten: 80 automatische Hagelsensoren

Die App ermöglicht es, während eines Hagelereignisses zeitnah einen Überblick zu erhalten, wo am Boden Hagel auftritt und welche Grösse die Körner in etwa erreichen. Die Gegenüberstellung mit den MESHS-Werten erlaubt eine Validierung von MESHS. Aber bei den Meldungen aus der App handelt es sich nicht um Messungen im physikalischen Sinne und die Meldungen lassen keine Aussage über die Korngrößenverteilung zu. Für eine weitere Validierung der MESHS-Werte und die Überprüfung der in der Rechenvorschrift von LEHA gemachten Annahmen über die Korngrößenverteilungen muss der Hagel mit kalibrierten Messgeräten erfasst werden. Dazu wurde in den Jahren 2018–2020 in der Schweiz ein Netz von 80 automatischen Hagelsensoren installiert (*MeteoSchweiz*, 2021). Die Sensoren befinden sich in den drei Hagel-Hotspots der Schweiz, 38 in der Region um den Napf, 27 im Südtessin und die restlichen 15 im Jura. Der Betrieb ist für acht Jahre geplant. Installation und Unterhalt erfolgen durch die inNET Monitoring AG und werden durch die Mobilair finanziert. Die wis-

senschaftlichen Auswertungen erfolgen an der Universität Bern, der EPFL und der MeteoSchweiz. Ziel ist nicht die flächendeckende Erfassung von Hagel; dazu müssten für die Fläche der Schweiz viele Tausend Sensoren installiert werden. Die Aufgabe der flächendeckenden Erfassung von Hagel leistet das Wettarradarnetz. Ziel der 80 Hagelsensoren ist es, einen Referenzdatensatz für die Forschung zu erhalten, anhand dessen die Radarhagelraten validiert, noch besser kalibriert und weiter verbessert werden können. Die Kombination der 80 automatischen Hagelsensoren, der vielen Hagelmeldungen aus der App und der neuen Wettarradartechnologie ist weltweit einzigartig und wird zu weiteren Verbesserungen der Hagelratenbasis für die Schweiz führen.

## 4 Hagelklimatologie: Hageltage und Hagelkorngrössen in der Schweiz

Auf Basis der neuen Radarhagelraten wurde das Angebot an Klimainformationen, die MeteoSchweiz zur Verfügung stellt, um Daten und Karten zum Hagelklima in der Schweiz erweitert (siehe Übersicht in Tabelle 2). Dabei wird zum einen die Intensität des Hagelvorkommens mittels der maximal aufgetretenen Hagelkorngrössen betrachtet, zum anderen die Hagelhäufigkeit auf Basis der Anzahl der Hageltage für verschiedene Intensitäts-Schwellwerte berechnet. Hageltage werden in drei Kategorien berechnet: Tage mit hoher Hagelwahrscheinlichkeit ab 80% bzw. mit Korngrössen über 2 cm und 4 cm. Die Basiseinheit stellen die Hageltage mit hoher Hagelwahrscheinlichkeit dar. Die Berechnung der Anzahl Hageltage basiert auf dem Radarhagelalgorithmus «Probability of Hail» POH (siehe Kapitel 1.1). Die Abgrenzung der Hageltage geschieht über einen Schwellwert von 80% POH, da Erfahrungswerte aus der Forschung und der Praxis der Versicherungsbranche zeigen, dass ab diesem Wert Schäden zu erwarten sind (Nisi et al. (2016), siehe auch Kapitel 4.2.1 «Wie ist ein Hageltag (Hagelereignis) definiert? »).

Die Daten der Radarhagelalgorithmen stehen seit dem Jahr 2002 in hoher Qualität zur Verfügung (siehe Kapitel 1 und Referenzen darin). Alle Hagelklima-Auswertungen werden monatlich für die Monate der konvektiven Saison April bis September sowie jährlich für das Sommerhalbjahr (April bis September) erstellt und monatlich erweitert. Da die Datenreihe der Radarhagelraten noch zu kurz ist, um Mittel über definierte klimatologische Normperioden von 30 Jahren zu berechnen, werden die langjährigen Mittelwerte über alle verfügbaren Jahre seit 2002 berechnet und jährlich aufdatiert. Aufgrund der hohen interannuellen Schwankungen muss damit gerechnet werden, dass sich die langjährigen Mittelwerte an einem Ort mit jedem neu abgeschlossenen Beobachtungsjahr ändern können.

### 4.1 Übersicht der Verfügbarkeit der Daten

Die jährlichen und monatlichen Gitterkarten, langjährige Mittelwerte der Hageltage und Hagelkorngrössen sowie die Wiederkehrwerte für die Schweiz stehen frei zur Verfügung (Links und Downloadmöglichkeiten siehe [www.hagelklima.ch](http://www.hagelklima.ch)). Ein Teil der Karten sind auch über das Kartenportal des Bundes einzusehen, was der Verbreitung und Nutzung dienlich ist. Die Basisdaten (5-minütliche und 24-stündige POH und MESHS Daten) werden nach den aktuellen Richtlinien der Gebührenverordnung MetV über den Kundendienst der MeteoSchweiz zur Verfügung gestellt. Grafiken der Gitterkarten stehen über die Webseite der MeteoSchweiz zum Download zur Verfügung. Die gezeigten Anomalien, Standardabweichungen sowie Mittelwerte für kürzere Zeitspannen (z.B. seit 2013, siehe Kapitel 2.4) lassen sich aus den zur Verfügung gestellten Gitterdaten berechnen.

#### 4 Hagelklimatologie: Hageltage und Hagelkorngrossen in der Schweiz

**Tabelle 2:** Übersicht der frei zur Verfügung stehenden Hagelklima-Daten und der nach Gebührenverordnung zur Verfügung stehenden Basisdaten der Hagelklimatologie. LEHA leitet sich aus dem MeteoSchweiz Radarhagelprodukt MESHS ab und wird daher nicht als originärer Datensatz geführt.

	Beschreibung	Basis-Parameter
<b>Monats- und Jahregitterkarten</b>	Monatliche und jährliche maximale Hagelkorngrossen	Maximum Expected Severe Hail Size <b>MESHS</b>
	Anzahl der Hageltage (ab 80% Hagelwahrscheinlichkeit POH)	Probability of Hail <b>POH</b>
<b>Langjährige Mittelwerte</b>	Anzahl Hageltage mit Hagelkorngrossen ab 2 cm und 4 cm	Maximum Expected Severe Hail Size <b>MESHS</b>
	Anzahl der Hageltage (ab 80% Hagelwahrscheinlichkeit POH)	Probability of Hail <b>POH</b>
<b>Gefährdungskarten</b>	Wiederkehrwerte der Hagelkorngrossen für verschiedene Wiederkehrperioden	Resampling-Methodik basierend auf <b>MESHS</b> und Gewitterzellen-Tracking <b>TRT</b>
<b>Basisdaten</b>	5-min Werte und aggregierte Tages-Felder (Maxima über 24-Stunden: 06-06 UTC sowie 00-00 UTC) <i>Die Basisdaten stehen nach den aktuellen Richtlinien der Gebührenverordnung MetV zur Verfügung</i>	Maximum Expected Severe Hail Size <b>MESHS</b> Probability of Hail <b>POH</b>

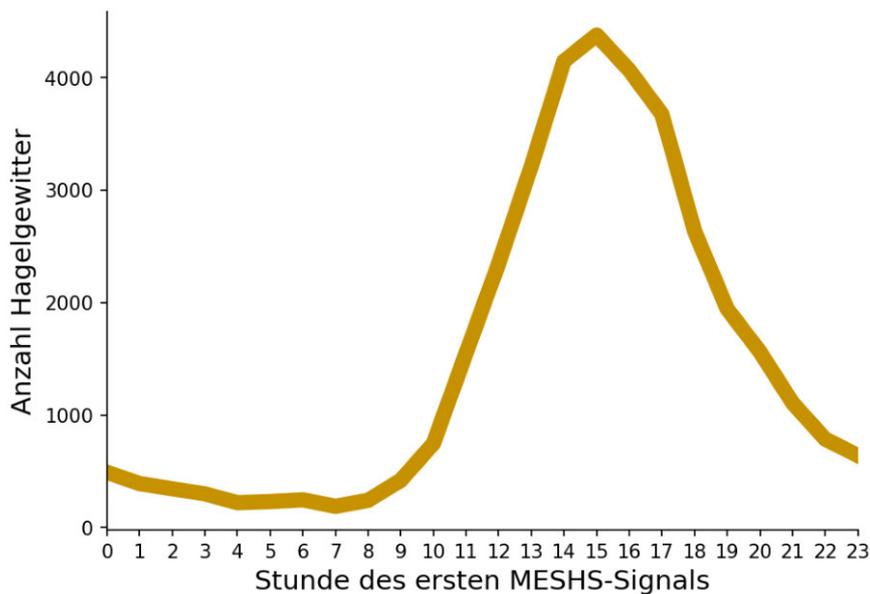
**Länge der verfügbaren Daten** Die im Bericht gezeigten klimatologischen Karten verwenden die Hageldaten seit 2002 bis und mit der Hagelsaison (April bis September) 2021 (20 Jahre). Für die Karten der klimatologischen Mittel ist damit zu rechnen, dass aufgrund der grossen Variabilität der Hagelereignisse bereits einzelne hinzukommende Jahre die örtlichen Statistiken der jährlichen/monatlichen Anzahl Hageltage erheblich beeinflussen können. Die Karten der Wiederkehrperioden wurden im Projekt «Hagelklima Schweiz» (Laufzeit Mai 2018 – Mai 2021) entwickelt. Sie basieren auf dem in Kapitel 5 beschriebenen Resampling-Verfahren, welchem Daten der Jahre 2002 bis 2020 zugrunde liegen. Durch das statistische Vervielfältigen vieler tausend individueller Hagelzüge ist dieser Ansatz robust gegenüber einzelnen Beobachtungsjahren, d.h., es ist nicht mit einer unmittelbaren Veränderung der Ergebnisse zu rechnen, wenn Hagelzugbahnen eines weiteren Jahres zur bereits grossen Grundgesamtheit hinzugefügt werden. Dennoch stellt die Beobachtungsperiode aus klimatologischer Sicht einen relativ kurzen Zeitraum dar. Es wird empfohlen, Ansatz und Ergebnisse der Gefährdungsanalyse zu überprüfen, wenn die verfügbare Datenmenge substantiell angewachsen ist.

## 4.2 Klimatologie der Hagelereignisse in der Schweiz

### 4.2.1 Wie ist ein Hageltag (Hagelereignis) definiert?

An einem Ort (entspricht einem Radarpixel von einer Fläche von einem Quadratkilometer) wird ein Tag als Hageltag gezählt, wenn während einer Zeitspanne von 24 Stunden während mindestens 5 Minuten ein Hagelereignis stattfand, welches eine Hagelwahrscheinlichkeit POH von mindestens 80% erreichte. Ab diesem Wert werden Schäden erwartet (siehe Kapitel 1.1). Hierbei wird die Zeitspanne von 8–8 Uhr lokaler Zeit, bzw. 6–6 Uhr Coordinated Universal Time (UTC) berücksichtigt. Um diese Tageszeit verzeichnet die langjährige Hagelaktivität ein Minimum (Abbildung 9). Hagelereignisse, die häufig einem ausgeprägten Tagesgang folgen, können so bestmöglich voneinander getrennt berücksichtigt

werden.



**Abbildung 9:** Tageszeit (Koordinierte Weltzeit UTC, volle Stunden) des ersten Hagelsignals für alle detektierten Hagelgewitter in der Radardomäne der MeteoSchweiz der Hagelsaisonen 2002–2021. In den frühen Morgenstunden wird ein Minimum verzeichnet.

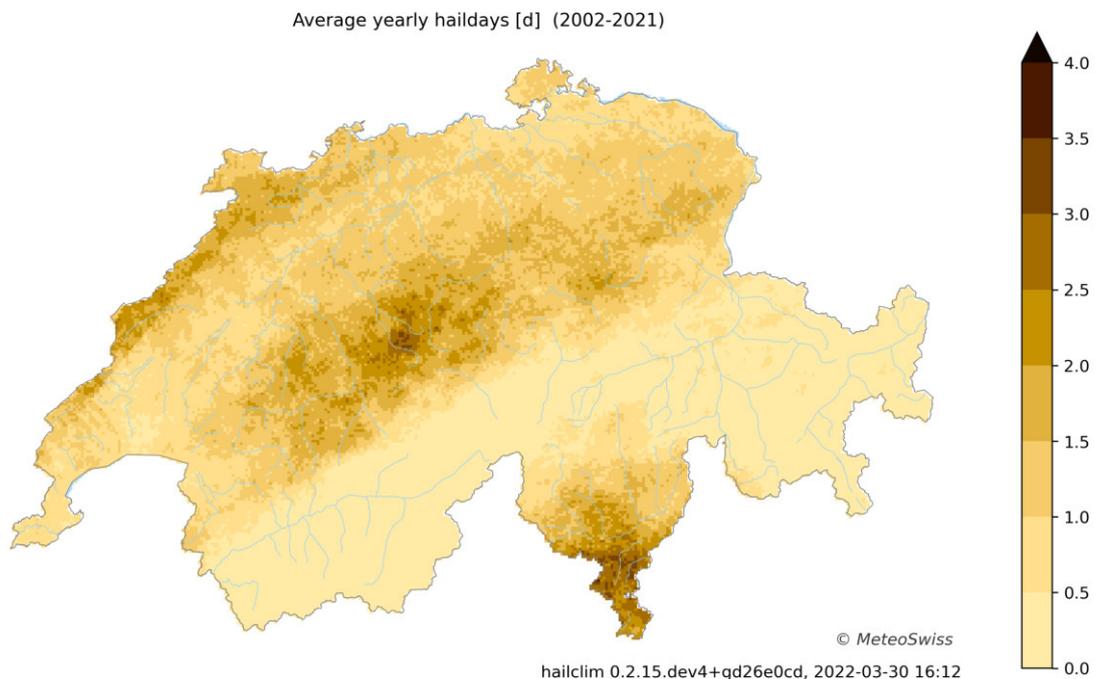
Oft sind Hageltage in einer Region von Interesse, zum Beispiel in der gesamten Schweiz oder einem bestimmten Kanton. In solch einem Fall ist nicht ein einzelner Ort bzw. ein Radar-Pixel von Interesse, sondern eine grössere Fläche. Für diesen Zweck werden für die Aufnahme eines Tags als Hageltag einer Region meist Schwellwerte verwendet, in denen eine betroffene Mindestflächen vorausgesetzt wird. Für die gesamte Schweiz beträgt diese Mindestfläche 100 km<sup>2</sup>. Dies passiert aus zwei Gründen: Zum einen wird so vermieden, dass bei einem eventuell auftretenden Fehlsignal, welches nur ein oder sehr wenige Pixel betrifft, fälschlicherweise ein Hageltag gezählt wird. Durch die umfassenden Qualitätskontrollen trifft dieser Fall sehr selten auf. Zum anderen handelt es sich bei Ereignissen, die echte Hagelsignale unter diesem Schwellwert erreichen, meist um sehr kurzlebige, lokal auftretende Gewitter, die keinen grossen Hagel produzieren können und aus der gesamtschweizerischen Perspektive nicht als Hageltag wahrgenommen werden.

Hageltage, wie alle Daten der Hagelklimatologie, werden für die konvektive Saison zwischen dem 1. April und dem 30. September berechnet. Die Radarhagelalgorithmen, welche die Nullgradgrenze aus dem Wettervorhersagemodell mitberücksichtigen, wurden für sommerliche Verhältnisse entwickelt und validiert. Ausserhalb dieser Zeiten tritt Hagel nur in wenigen Einzelfällen auf und erreichte nur kleine Korngrössen. Es ist ein plausibles Szenario, dass sich im Zuge der Klimaerwärmung neben vielen anderen potentiellen Veränderungen auch die konvektive Saison ausdehnt und Hagelunwetter früher oder später im Jahr auftreten werden. Inwieweit und wann sich solche Veränderungen zeigen werden, ist jedoch noch Gegenstand aktueller Forschung.

#### 4 Hagelklimatologie: Hageltage und Hagelkorngrossen in der Schweiz

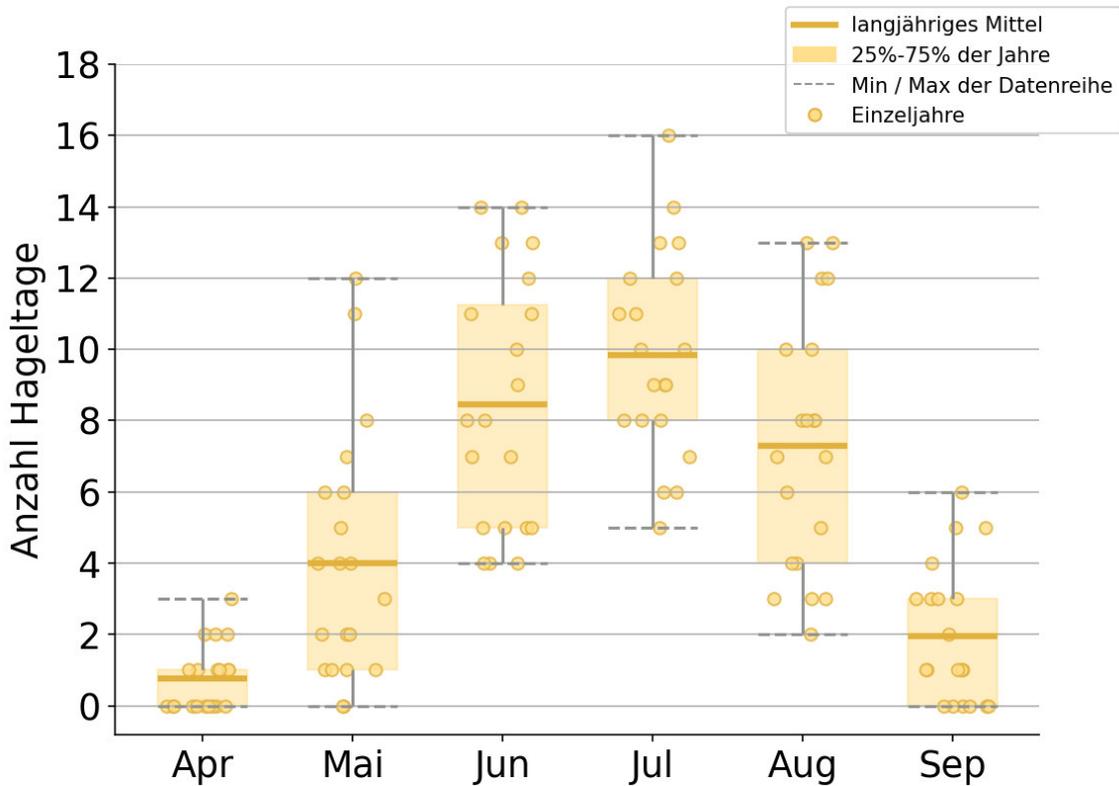
##### 4.2.2 Klimatologie der Hageltage: Wie häufig kommt Hagel in der Schweiz vor?

Abbildung 10 zeigt die langjährigen Mittelwerte der jährlichen Anzahl Hageltage pro Ort in der Schweiz. Hagel tritt in der Schweiz räumlich sehr differenziert auf: Nördlich der Alpen tritt Hagel am häufigsten im zentralen Alpenvorland des Mittellandes in der Region Napfgebiet, Entlebuch, und Emmental auf (örtlich bis 3.3 Hageltage/Jahr). Schweizweit tritt im südlichen Tessin mit bis zu 3.6 Hageltagen Hagel am häufigsten auf. Auch entlang des Jurabogens ist eine erhöhte Hagelaktivität mit bis zu 2.4 Tagen im Jahr zu erkennen. Ein Teil der Region ist jedoch aufgrund einer auch in der Klimatologie sichtbaren Abschattung der Radarstation La Dôle mit grösseren Unsicherheiten behaftet (Details siehe Kapitel 2.5). In den inneralpinen Regionen des Wallis und zentralen bis südlichen Graubünden ist Hagel dagegen ein seltenes Phänomen: An vielen Orten wurde ein POH-Wert von 80% in der Beobachtungsperiode nur ein oder zweimal erreicht oder überschritten.



**Abbildung 10:** Karte des langjährigen Mittels (2002-2020) der Anzahl der jährlichen Hageltage in der Schweiz. Ein Hageltag wird als solcher definiert, wenn die Hagelwahrscheinlichkeit Probability of Hail POH während mindestens 5 Minuten 80% erreicht oder überschreitet.

Die Anzahl der Hageltage ist über die Hagelsaison nicht konstant. Am häufigsten tritt Hagel von Mai bis August auf, im April und September tritt meist nur wenig Hagel auf. Die meisten Hageltage werden im Durchschnitt im Juli verzeichnet (Abbildung 11). Zwischen Mai und August zeigen die vergangenen 20 Jahre jedoch eine grosse Variabilität: die Jahresmaxima an Hageltagen pro Monat traten auch bereits im Mai oder erst im August auf.

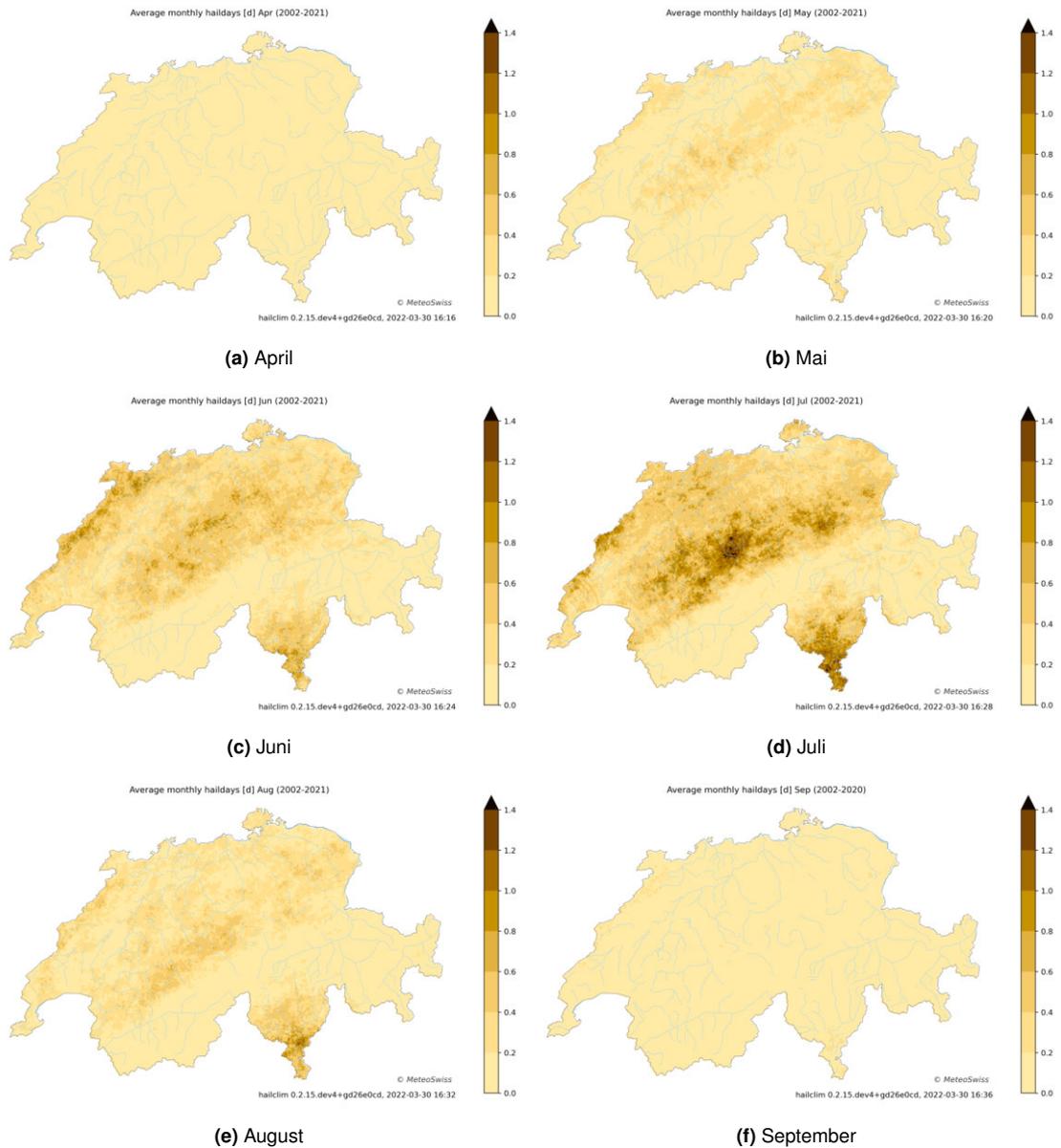


Stand: 2021-11-11; Definition: POH  $\geq$  80% über  $\geq$  100 km<sup>2</sup>

**Abbildung 11:** Einzeljahre (Kreise) und Statistik (Boxplots) des Jahresgangs der Anzahl monatlicher Hageltage (POH  $\geq$  80% über mind. 100 km<sup>2</sup>) in der Schweiz über die Jahre 2002 bis 2021.

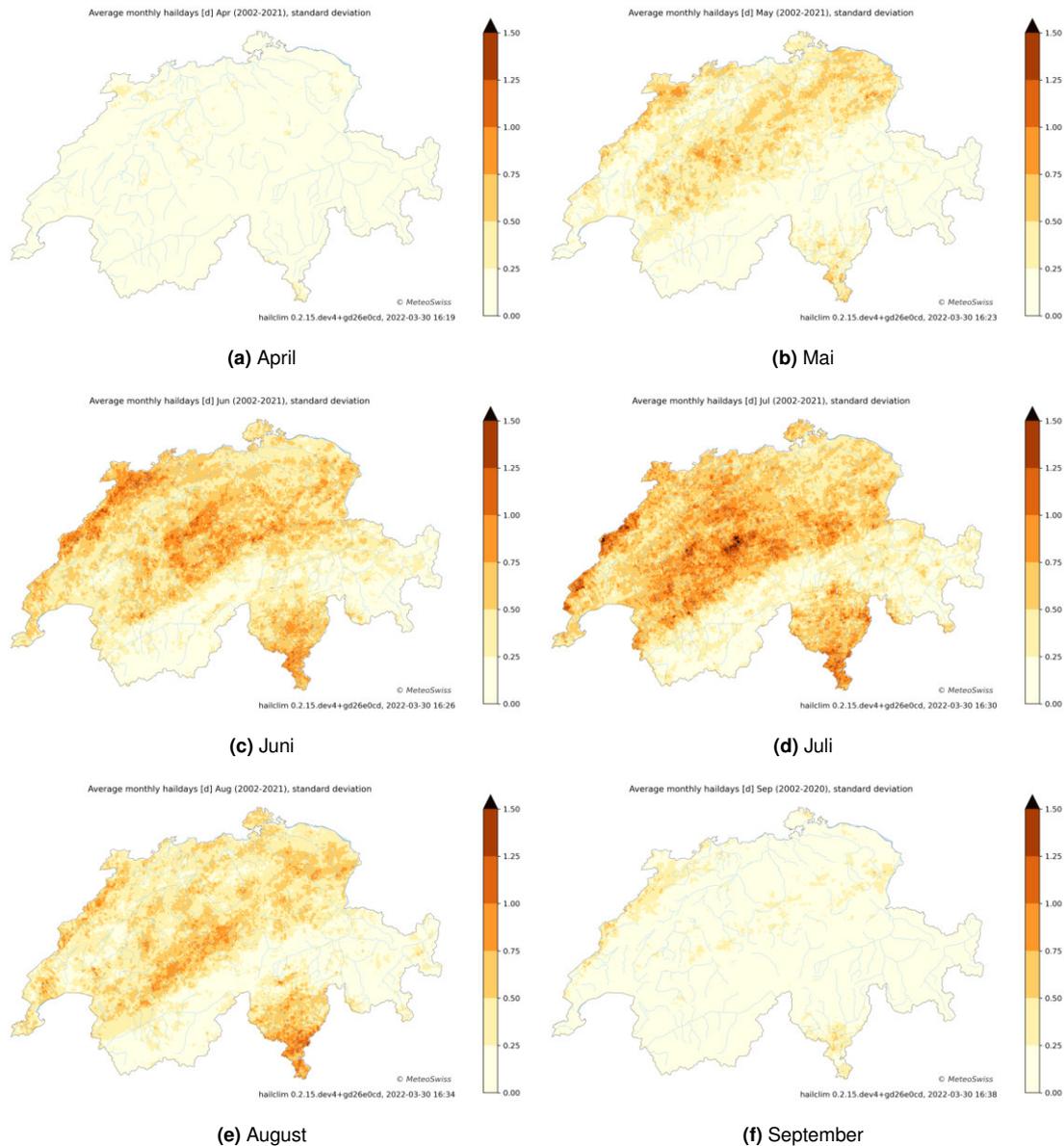
Räumlich zeigt sich, dass mit Hagel im Jahresverlauf zunächst vor allem in den hagelreichen Regionen zu rechnen ist, während im Juni und Juli Hagel auch verbreitet im Mittelland auftritt (Abbildung 12). Die Hotspots im südlichen Tessin und der Emmental-Entlebuch Region sind vor allem in Juli stark ausgeprägt.

**4 Hagelklimatologie: Hageltage und Hagelkorngrossen in der Schweiz**



**Abbildung 12:** Langjähriges Mittel (2002-2020) der Anzahl der monatlichen Hageltage in der Schweiz für die Monate der konvektiven Saison April bis September.

Auch räumlich zeigen sich die grossen Schwankungen von Jahr zu Jahr, ausgedrückt mithilfe der Standardabweichung der monatlichen Anzahl Hageltage (Abbildung 13). Ist die Standardabweichung im Verhältnis zur absoluten Zahl der Hageltage hoch, bedeutet dies, dass die einzelnen Jahre oft stark vom langjährigen Mittel abweichen. Am gleichen Ort treten also sowohl Jahre mit sehr vielen Hageltagen als auch Jahre mit sehr wenigen Hageltagen auf, die interannuelle Variabilität ist gross.

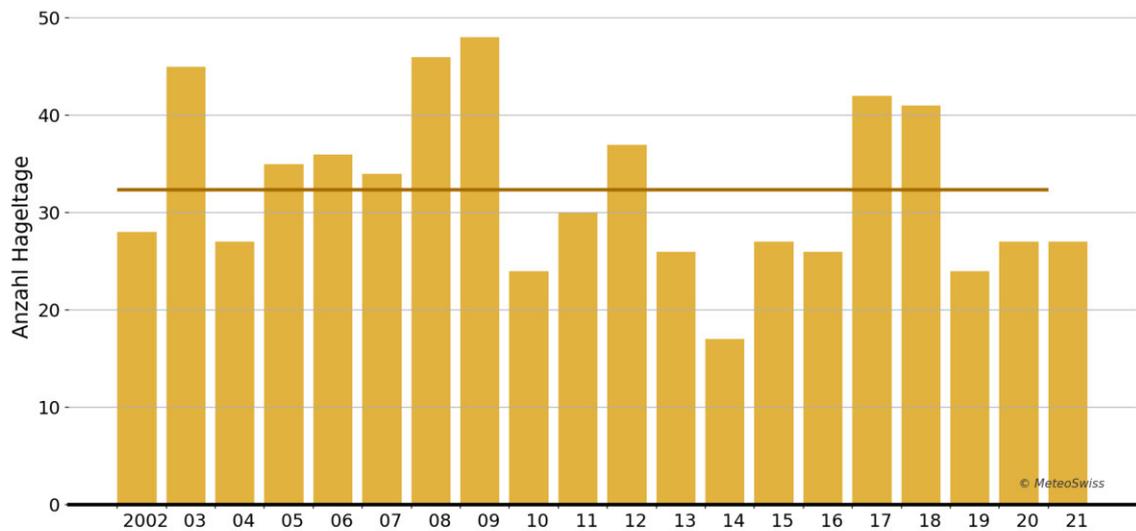


**Abbildung 13:** Standardabweichung der Anzahl der monatlichen Hageltage in der Schweiz für die Monate der konvektiven Saison April bis September über die Jahre 2002-2021.

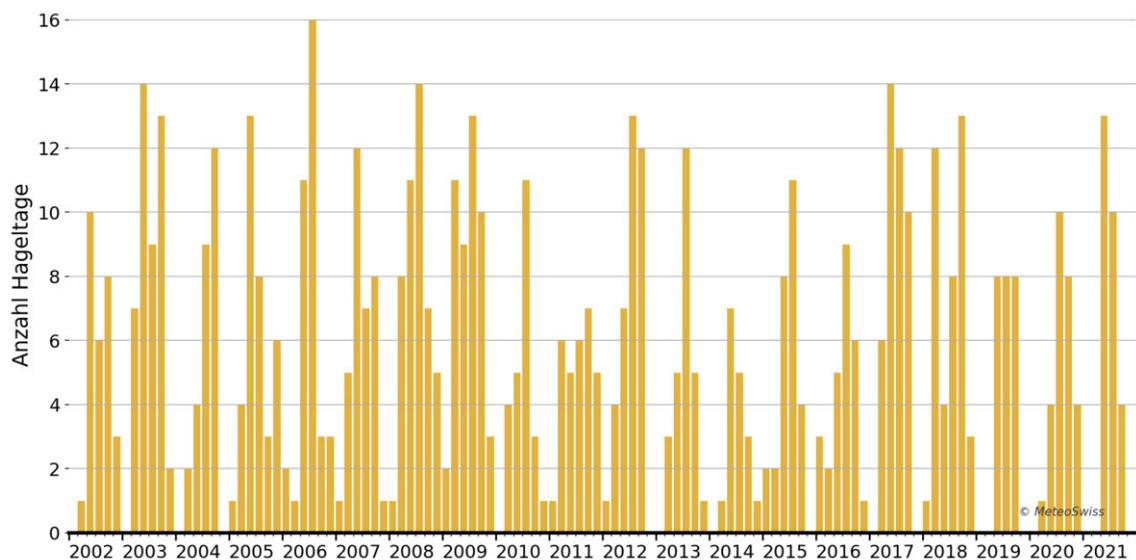
#### 4.2.3 Jährliche und monatliche Hageltage seit April 2002

Schweizweit wurden im langjährigen Mittel (2002–2021) 32,3 Hageltage mit mindestens 100 km<sup>2</sup> Hagelfläche (POH  $\geq$  80%) verzeichnet (horizontale Linie in Abbildung 14, oben). Die Standardabweichung beträgt 8,4 Tage, einzelne Jahre weichen von diesem Mittelwert immer wieder stark ab. Abbildung 14, unten), zeigt die Anzahl Hageltage pro Monat der Hagelsaison seit 2002. Man erkennt auch hier den ausgeprägten Jahresgang (vgl. auch Abbildung 11) und eine ausgeprägte räumliche Variabilität.

**4 Hagelklimatologie: Hageltage und Hagelkorngrossen in der Schweiz**



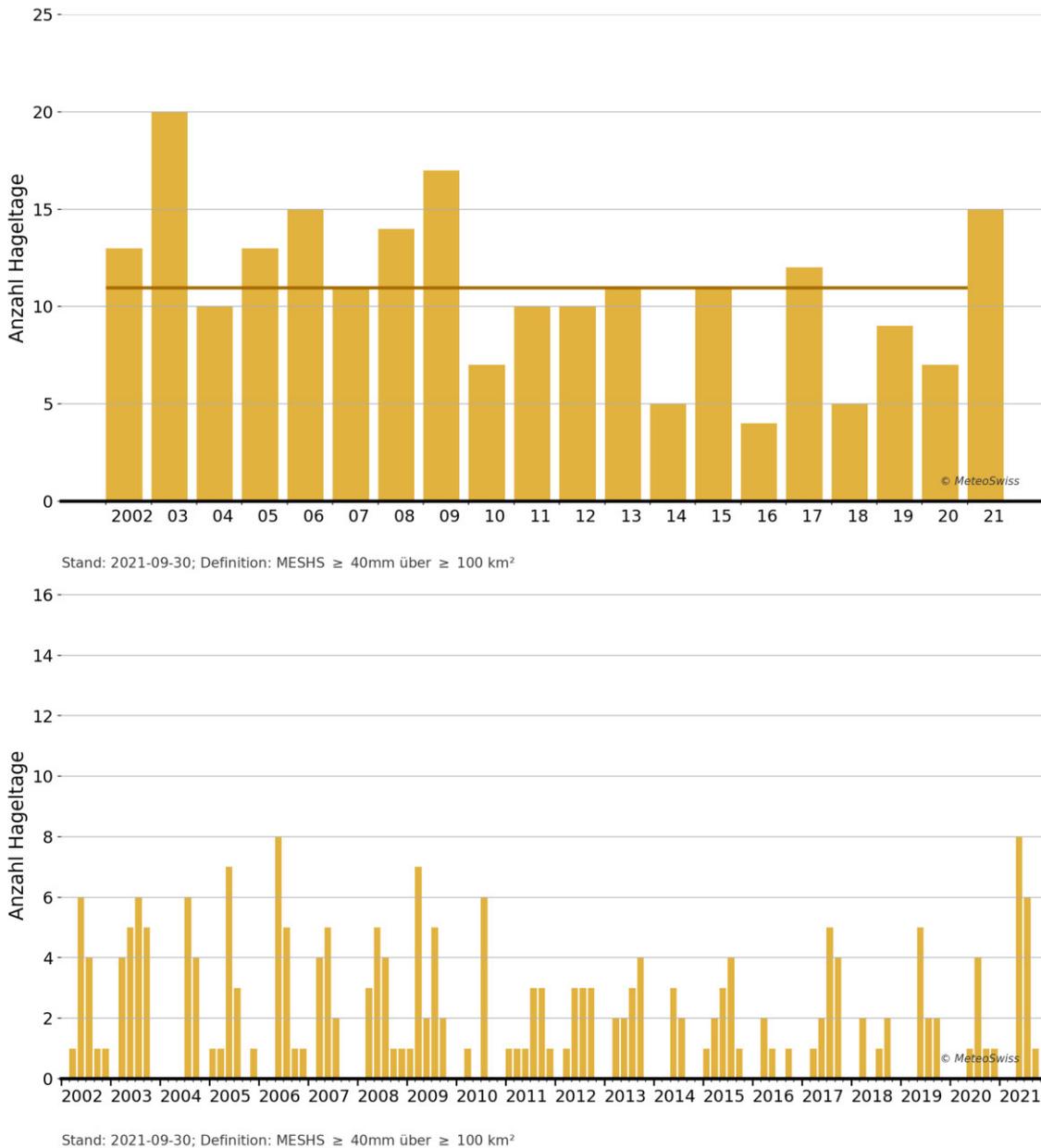
Stand: 2021-11-11; Definition: POH  $\geq$  80% über  $\geq$  100 km<sup>2</sup>



Stand: 2021-11-11; Definition: POH  $\geq$  80% über  $\geq$  100 km<sup>2</sup>

**Abbildung 14:** Anzahl Hageltage (ab POH 80%, 100 km<sup>2</sup>) pro Jahr (oben) und pro Monat (unten) seit 2002 über die Monate April-September 2002–2021.

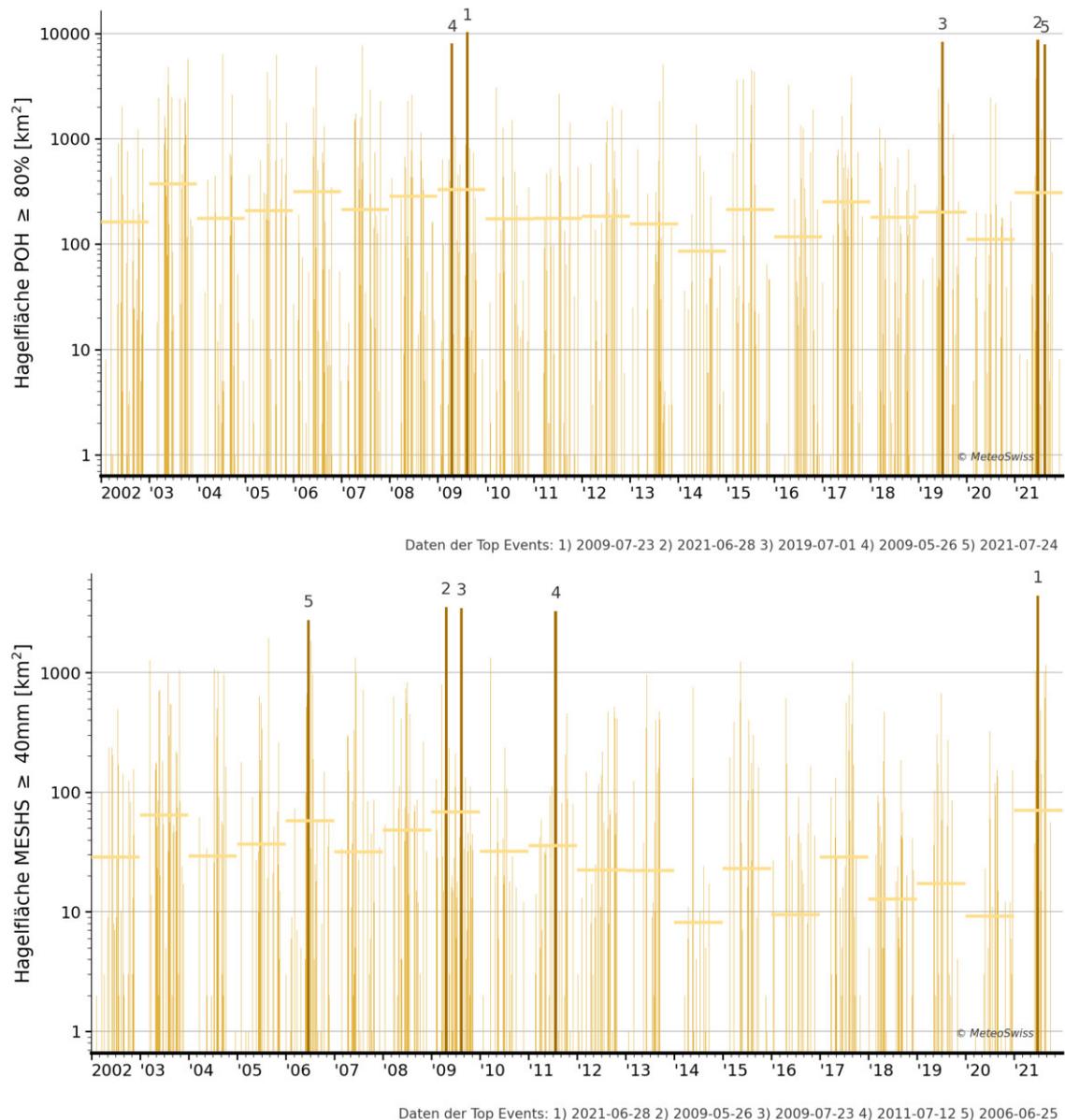
Für die Anzahl Hageltage werden alle Tage, die über die festgelegte Mindestfläche von 100 km<sup>2</sup> POH-Werte von mindestens 80% erreichten, gezählt. Es lässt sich aus dieser Häufigkeit also nicht direkt auf das Ausmass der betroffenen Fläche oder die Intensität der Hageltage schliessen. Lokal wird die Intensität über die maximal möglichen Hagelkorngrossen MESHS analysiert (siehe Kapitel 4.3). Für eine gesamtschweizerische Einschätzung erlaubt es die Auswertung der Hagelereignisse ab 4 cm MESHS, Aussagen über die Intensität auch in der Fläche zu machen. Dabei wird deutlich, dass Häufigkeit und Intensität nicht immer im gleichen Verhältnis stehen: Abbildung 14 (oben) zeigt, dass das beispielsweise im Jahr 2021 Hagel jedweder Grösse leicht unterdurchschnittlich häufig auftrat (an 27 Tagen). Der Anteil der Hageltage ab 4 cm MESHS (Abbildung 15, unten) lag in diesem Jahr mit 15 Tagen jedoch deutlich über dem langjährigen Durchschnitt von 11 Tagen (Standardabweichung: 4 Tage).



**Abbildung 15:** Anzahl Hageltage in der Schweiz mit mindestens 4 cm Hagelkorngrosse MESHS über mind. 100 km<sup>2</sup> pro Jahr (oben) und pro Monat (unten) seit 2002 über die Monate April bis September 2002–2021.

Um das Flächenausmass von Hagelereignissen einordnen zu können, zeigen Balkendiagramme die täglichen Summen der Hagelflächen (siehe Abbildung 16). Die Zeitreihe der Flächenereignisse wird für verschiedene zuvor definierte Schwellwerte von beispielsweise POH 80% oder 4 cm MESHS erstellt. Die Analyse zeigt, dass im Jahr 2021 das Hagelereignis mit der zweitgrössten betroffenen Fläche über POH 80% und der seit Aufzeichnungen grössten Fläche mit Korngrossen über 4 cm aufgezeichnet wurde (siehe Abbildung 16).

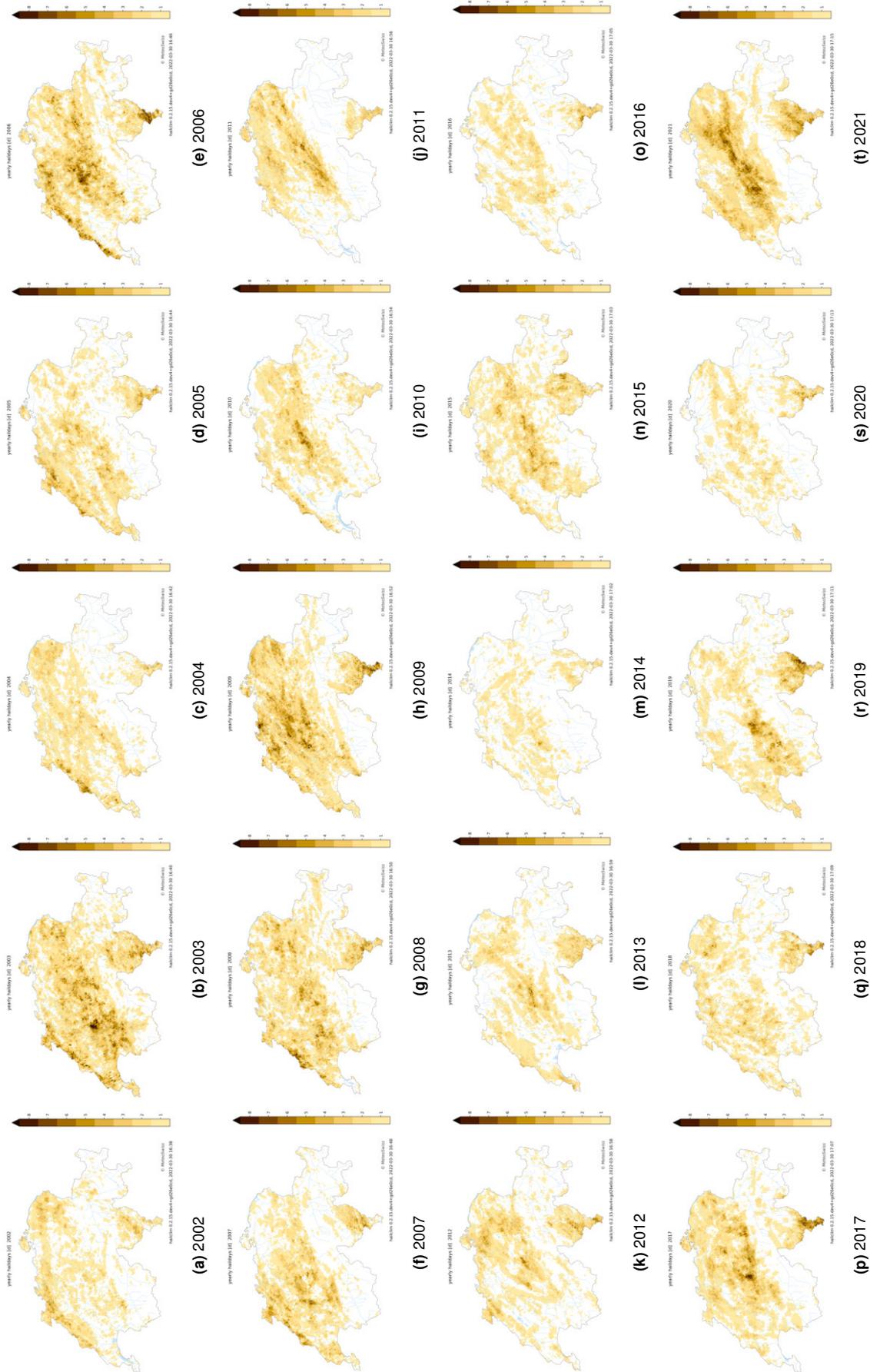
**4 Hagelklimatologie: Hageltage und Hagelkorngrossen in der Schweiz**



**Abbildung 16:** Tägliche Hagelfläche ab POH 80% (oben) und ab MESHS 4 cm (unten) seit 2002 über die Monate April-September 2002-2021. Die fünf Tage mit dem grössten betroffenen Flächenausmass über dem jeweiligen Schwellwert sind mit Rangzahlen indiziert. Horizontale Linien zeigen die mittlere betroffene Fläche pro Tag je Jahr.

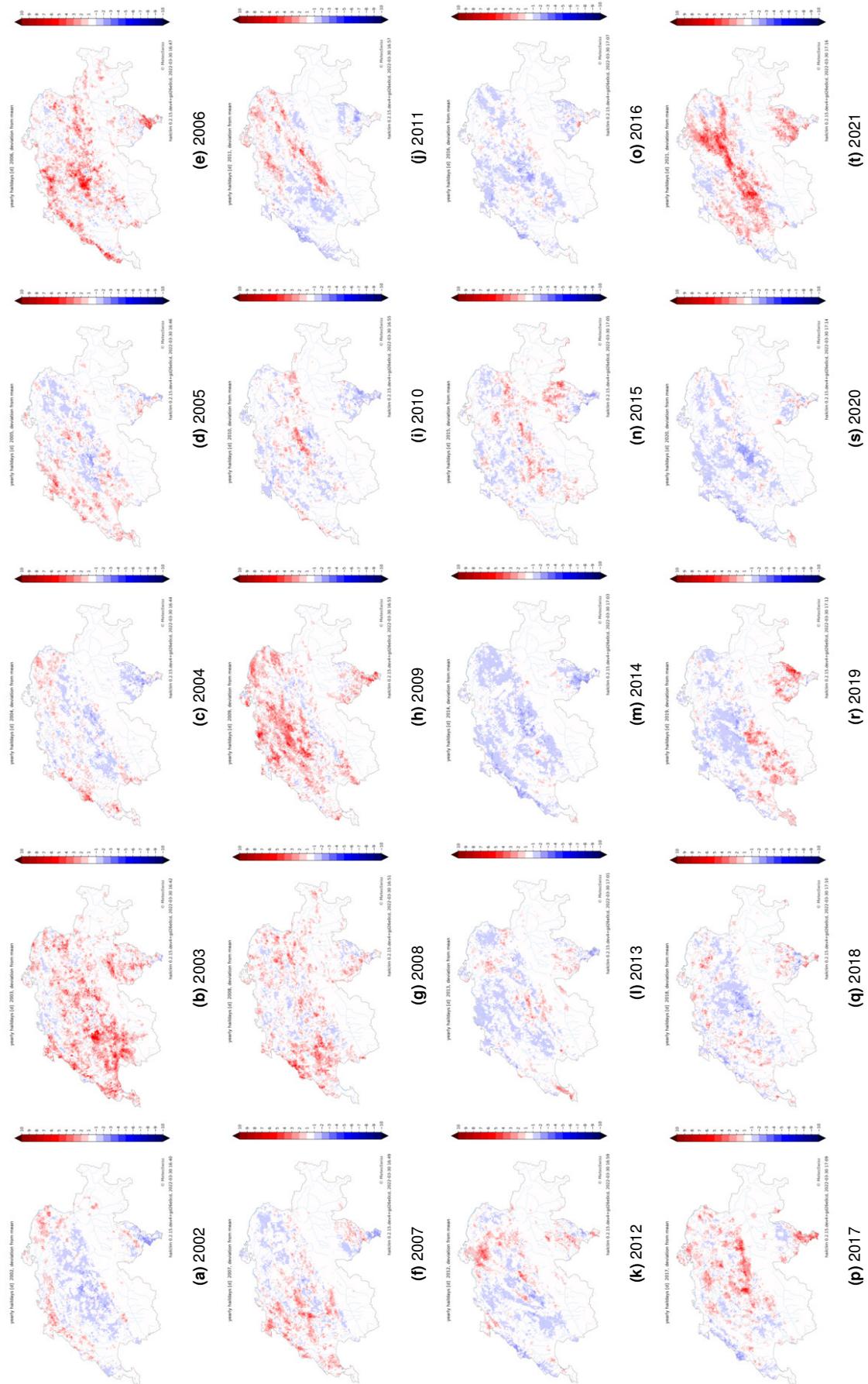
Abbildung 17 zeigt die Jahressgitterkarten der Anzahl Hageltage für alle Jahre 2002–2021. Sie zeigen die Variabilität in der Anzahl Hageltage zwischen den Jahren. Ausserdem wird ersichtlich, dass die Grösse und räumliche Ausdehnung der von Hagel betroffenen Flächen von Jahr zu Jahr variieren. Besonders in der ersten Hälfte der Beobachtungsperiode sowie 2021 waren grosse Teile der Schweiz im selben Jahr von mehreren Hageltagen betroffen, während in anderen Jahren nur über wenigen Orten ein Hageltag verzeichnet wurde.

Die Karten der Abweichungen der jährlichen Hageltage vom langjährigen Mittel (Abbildung 18) zeigen, welche Regionen in jedem Jahr von mehr (rot) oder weniger (blau) Hageltagen betroffen waren, als im langjährigen Durchschnitt erwartet.



**Abbildung 17: Anzahl jährlicher Hageltage 2002 bis 2021. Dunklere Farben bedeuten mehr Hageltage. Die Karten und Daten der Hageltage aller Jahr und Monate (April–September) sind über [www.meteoschweiz.ch](http://www.meteoschweiz.ch) verfügbar.**

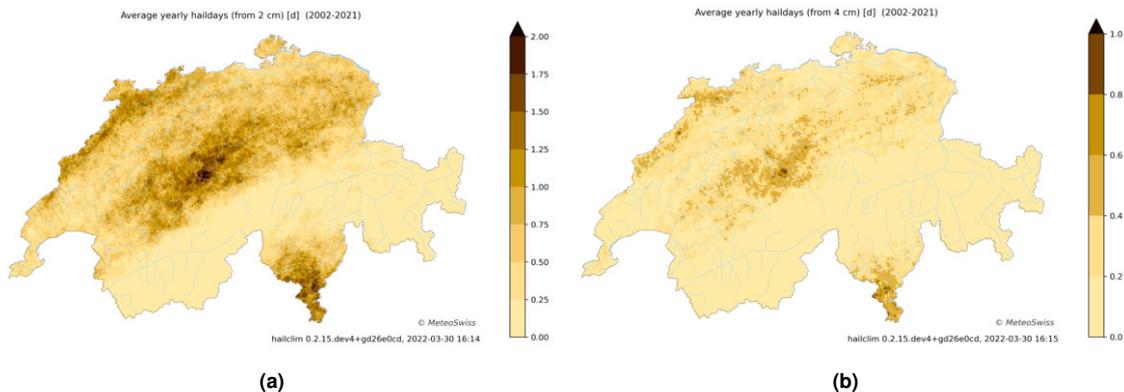
4 Hagelklimatologie: Hageltage und Hagelkorngrossen in der Schweiz



**Abbildung 18:** Abweichungen der Anzahl jährlicher Hageltage vom langjährigen Mittel für die Jahre 2002 bis 2021. Die Anomalien werden aus den Gitterdaten der Anzahl Hageltage pro Jahr berechnet.

### 4.3 Hagelkorngrossen MESHS

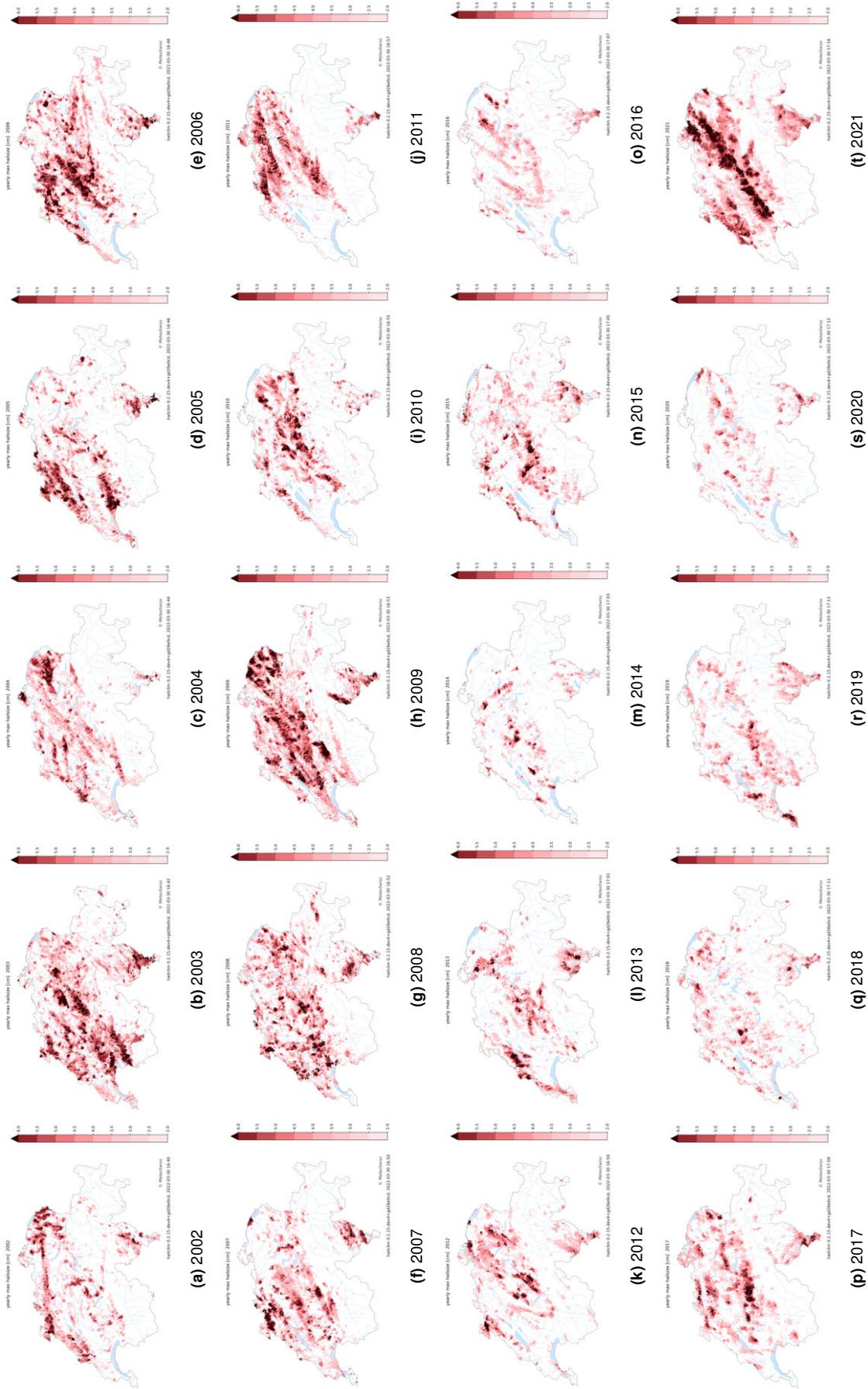
Neben der Häufigkeit von Hagelvorkommen ist die Intensität der Hagelgewitter massgebend für die zu erwartenden Schäden. Ein Hauptmerkmal der Intensität sind die Hagelkorngrossen. Sie spielen sowohl in der Prävention, als auch der Ereignisbewältigung eine wichtige Rolle. Die Schweizer Hagelklimatologie nutzt den Radar-Hagelalgorithmus MESHS (siehe Kapitel 1.2), um die maximal zu erwartenden Hagelkorngrossen pro km<sup>2</sup> zu analysieren. Generell ist in den Regionen, in welchen am häufigsten Hagel auftritt, auch am häufigsten mit intensiveren Ereignissen und grossen Korngrossen zu rechnen. Dies zeigen die Karten der langjährigen Mittel der Anzahl Hageltage mit Hagelkörnern von mindestens 2 cm und mindestens 4 cm (Abbildung 19).



**Abbildung 19:** Langjähriges Mittel der Hagelereignisse mit mindestens 2 cm Korngrösse MESHS (a, links) bzw. 4 cm Korngrösse MESHS (b, rechts). Achtung: unterschiedliche Skalierung der Farbtabelle.

Da an den meisten Orten an den meisten Messzeitpunkten keine Hagelkörner auftreten, ist es wenig aussagekräftig, ein langjähriges Mittel der Hagelkorngrossen zu berechnen: Da der Datenwert oft Null ist, werden sehr kleine Durchschnittsgrössen berechnet, welche das Risiko für tatsächlich auftretende Korngrössen nicht adäquat widerspiegeln. Alternativ können nur die vorkommenden Hagelkorngrossen ohne die Nicht-Hagel-Zeitschritte gemittelt werden. So erhält man eine Information über die an einem Ort beobachteten Hagelkorngrossen, jedoch ist dieser Wert wiederum aufgrund der grossen Schwankungen von Jahr zu Jahr nicht aussagekräftig, um jährlich zu erwartende Korngrössen zu berechnen. Als Mass für die jährliche Häufigkeit von grösseren Korngrössen werden deshalb ergänzend die Tage berechnet, an denen während mindestens 5 Minuten Hagelkorngrossen MESHS von 2 cm bzw. 4 cm beobachtet wurden. Abbildung 20 zeigt die für jedes Jahr der Beobachtungsperiode maximale Korngrössen MESHS. Häufig sind die Zugbahnen der einzelnen Gewitterlinien, welche meist von Süd-West nach Nord-Ost ziehen, gut erkennbar. Die grössten Hagelkorngrossen werden dabei meistens über kleine Flächen verzeichnet. Die grössten Flächen mit MESHS-Werten über 4 cm (4400 km<sup>2</sup>) und über 6 cm (1100 km<sup>2</sup>) seit Beginn der Auswertungen 2002 wurden am 28. Juni 2021 verzeichnet (*Kopp et al., 2022*). Ebenfalls im Jahr 2021, am 8. Juli 2021, trat mit 15'400 km<sup>2</sup> das flächenmässig grösste Ereignis in der Schweizer Wetterradar-Domäne südlich des Alpenhauptkammes auf (*Kopp et al., 2022*).

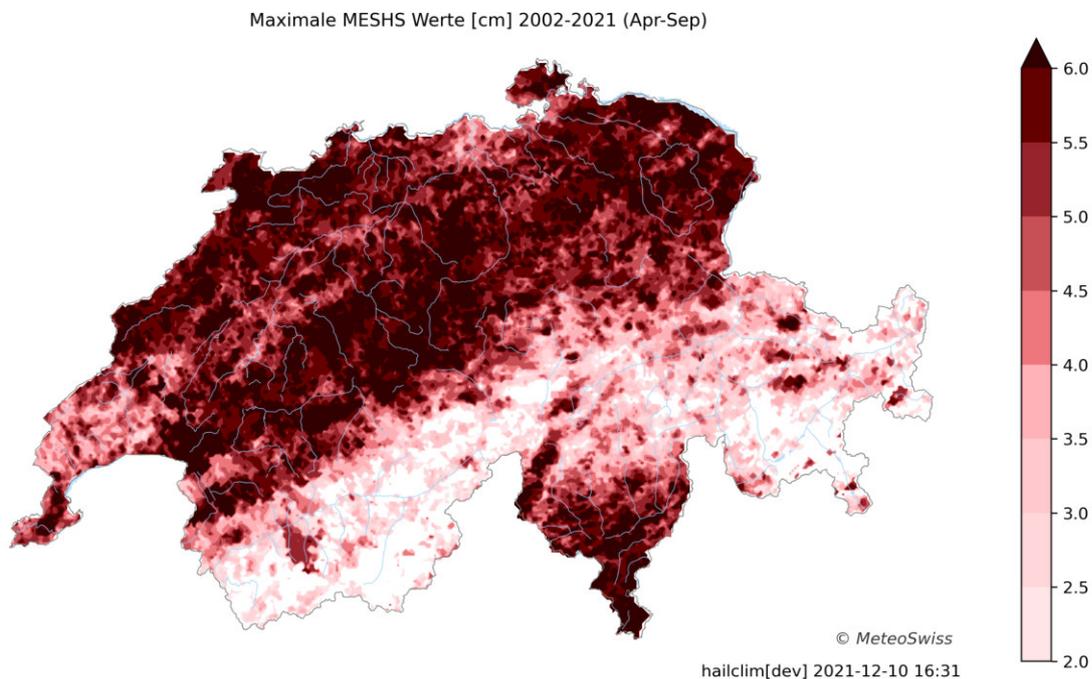
**4 Hagelklimatologie: Hageltage und Hagelkorngrossen in der Schweiz**



**Abbildung 20:** Maximale jährlich beobachtete Hagelkorngrossen MESHS 2002 bis 2021. Dunklere Farben bedeuten grössere Hagelkorngrossen. Die Karten und Daten der maximalen Hagelkorngrossen aller Jahr und Monate (April-September) sind über [www.meteoschweiz.ch](http://www.meteoschweiz.ch) verfügbar.

### 4.3.1 Grösste beobachtete Hagelkorngrössen

**4.3.1.1 Radarmessungen seit 2002** Mit Ausnahme der hochalpinen Gegenden und der inneralpinen Täler wurden seit Beginn der Messungen im Jahr 2002 verbreitet mindestens einmal Signalstärken von MESHS grösser als 6 cm verzeichnet (vgl. Abbildung 21). Die Signale sind auch in der 20 Jahre langen Zeitreihe häufig noch erkennbar einzelnen Hagelzellen zuzuordnen, vor allem in den hagelärmeren Regionen. Zwar werden ausgeprägte Hotspots wie die Emmental-Entlebuch-Napf Region von sehr spezifischen regional-lokalen Zusammenspiel von Orographie, Anströmung, und Windverhältnissen geprägt. Diese führen zu einer Häufung und Konzentration von Hagelvorkommen in einer geographisch eng begrenzten Region (Schwyn, 2021). Generell ist jedoch anzunehmen, dass aufgrund der stochastischen Natur konvektiver Gewitterzellen die Auftretenswahrscheinlichkeiten von Hagelgewittern in benachbarten Regionen ähnlich sind. Diese Problemstellung ist aus der Wettervorhersage bekannt. Es kann oft mit grosser Sicherheit davor gewarnt werden, dass schwere Gewitter zu erwarten sind, jedoch meist nicht sicher vorhergesagt werden, *wo genau* diese auftreten werden. Die Tatsache, dass auch in der langjährigen Zusammenfassung einzelne Gewitterzellen noch deutlich zu erkennen sind, deutet bereits darauf hin, dass eine räumliche Risikoabschätzung auf den Beobachtungsdaten allein die zugrundeliegenden lokalen Auftretenswahrscheinlichkeiten nicht adäquat widerspiegeln kann (mehr zur langfristigen räumlichen Risikoabschätzung ab Kapitel 5).

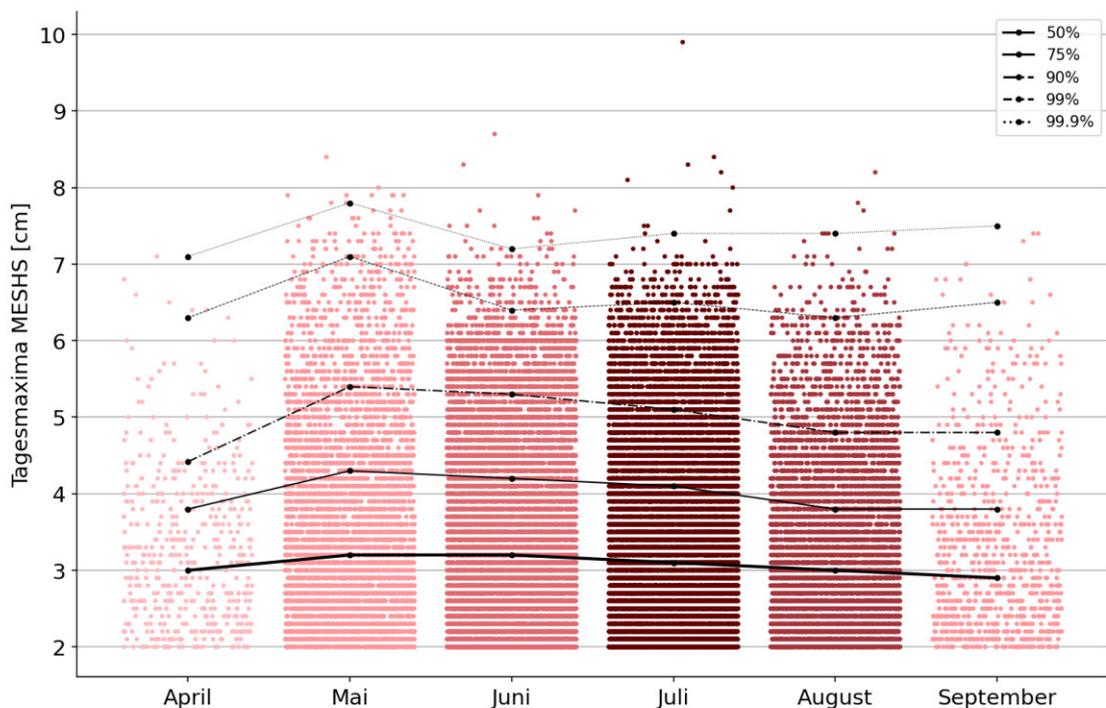


**Abbildung 21:** Maximalwerte der lokalen Hagelkorngrössen MESHS über den gesamten Beobachtungszeitraum (2002-2021).

Auch für die Hagelkorngrössen MESHS lassen sich Unterschiede im Jahresgang feststellen (Abbildung 22). Grosse Hagelkorngrössen können zu jeder Jahreszeit der Hagelsaison auftreten, jedoch ist die Frequenz im April und September deutlich niedriger. Die gesamte von MESHS betroffene Fläche

**4 Hagelklimatologie: Hageltage und Hagelkorngrößen in der Schweiz**

ist im Durchschnitt Juli über 35-mal so hoch wie im April. Extreme Werte von 8 cm MESHS und mehr werden generell sehr selten, und mit wenigen Ausnahmen nur in den Sommermonaten Juni, Juli und August erreicht. Die Perzentilwerte (schwarze Linien) in Abbildung 22 zeigen an, welcher Anteil der Daten jeweils unter dem angezeigten Wert liegt. Liegt das 50. Perzentil bei 3 cm, heisst dies, dass 50% der Tagesmaxima im April unter 3 cm lagen. Diese Perzentilwerte ändern sich relativ wenig über die Hagelsaison. Es hagelt zwar im Juli häufiger als im September, aber wenn es einmal hagelt, ist die Verteilung der Hagelkorngrößen relativ ähnlich, wobei der Anteil der Flächen mit grossen Hagelkorngrößen im Mai am grössten ist.



**Abbildung 22:** MESHS im Jahresverlauf: Tagesmaxima der MESHS-Werte aller betroffenen Orte (Radar-Pixel) je Monat (2002-2021). Schwarze Linien zeigen die angegebenen Perzentilwerte für jeden Monat.

**4.3.1.2 Grosse historische Hagelkorngrößen in der Schweiz und weltweit** Systematische, automatisierte und qualitätsgeprüfte Radarbeobachtungen stehen der Hagelforschung erst seit wenigen Jahrzehnten oder gar Jahren zur Verfügung. Koordinierte Bodenmessungen mittels automatischer Hagelsensoren werden in der Schweiz seit 2018 erhoben (*MeteoSchweiz*, 2021). Daher sind Aussagen zu den grössten möglichen Hagelkorngrößen auf Basis ausschliesslich dieser Daten nicht robust. Jedoch liefern Berichte von historischen Extremereignissen, einzelne Fallstudien zu Extremereignissen, sowie Daten der Hagelversicherungen wertvolle Hinweise auf das Hagelgeschehen auch weit über die Radarbeobachtungsperiode und –Domäne hinaus.

Das grösste dokumentierte Hagelkorn in der Schweiz fiel wahrscheinlich am 2. August 1927 in einem der schwersten bekannten historischen Hagelunwetter. Es erreichte wohl um die 13 cm und wurde in den zentralen Voralpen beobachtet (*Schweizer Sturmarchiv*, 2021). Für die Schweiz wurden Hagelkorngrößen von 7-10 cm im vergangenen Jahrhundert immer wieder berichtet, laut der Schweizer Unwetterdatenbank *sturmforum.ch* 11-mal seit 1900 (*Schweizer Sturmarchiv*, 2021). Zuletzt traten im Sommer 2021 grosse Korngrößen mit bis zu 9 cm in der Schweiz auf, die aussergewöhnlichen

Ereignisse von 2021 (*Kopp et al., 2022*) wurden in der vorliegenden Studie nicht berücksichtigt. In Deutschland wurde das grösste dokumentierte Hagelkorn mit etwa 14 cm Grösse am 6. August 2013 in der Region Reutlingen in Südwestdeutschland verzeichnet (*Kunz et al., 2018*). Weltweit wurden die Rekorde der grössten Hagelkörner in Nord – und Südamerika gemessen, mit 20 cm am 23. Juli 2010 in South Dakota, USA, und 18.8 cm-23.7 cm in Argentinien am 8. Februar 2018 (*Kumjian et al., 2020*).

## 5 Karten der Wiederkehrwerte

Im Risikomanagement und der Gefährdungsabschätzung sind Auftretenswahrscheinlichkeiten von Hagelkorngrossen eine relevante Grösse. Ein Beispiel ist die Prävention von Schäden an langlebigen Bauteilen. Diese sollen so beschaffen sein, dass sie auch Hagelkorngrossen standhalten, die nur alle paar Jahrzehnte auftreten. Auch für die Berechnung von Versicherungsbeiträgen, beispielsweise in der Landwirtschaft, sind Auftretenswahrscheinlichkeiten von grosser Bedeutung. Aber nicht nur in der Vorsorge, auch nach einem Ereignis geben die Berechnungen eine Orientierung, wie selten bzw. extrem das Auftreten einer Hagelkorngrosse ist. Diese Auftretenswahrscheinlichkeiten werden als Wiederkehrperioden in Jahren angegeben und beschreiben, in welchen zeitlichen Intervallen, beispielsweise 10 oder 50 Jahre, Hagelkorngrossen an einem Ort durchschnittlich auftreten (Details zur Interpretation von Wiederkehrperioden siehe Kapitel 5.1). Die Zeiträume, die in der Gefährdungsabschätzung von Interesse sind, sind dabei in der Regel länger als die verfügbaren Datenreihen. So wird zum Beispiel ein Schutz gegen 25-, 50- oder 100-jährliche Ereignisse angestrebt.

Um trotz beschränkter Datenverfügbarkeit Aussagen über selten auftretende Naturgefahren zu machen, werden typischerweise statistische Ansätze aus der Extremwertstatistik genutzt (z.B. *Coles, 2001*; *Fukutome and Schindler, 2018*). Auch diese Ansätze verlangen in der Regel kontinuierliche Datenaufzeichnungen über mindestens mehrere Jahrzehnte, beispielsweise an einem Flusspegel oder einer Wetterstation. Das Wetterphänomen Hagel stellt die Anwendung dieser klassischen Berechnungsweise vor Herausforderungen: Neben der klimatologisch kurzen Zeitreihe von 19 Jahren<sup>1</sup> tritt Hagel, an einem einzelnen Ort betrachtet, nur selten auf und währt kurz - meist nur einige Minuten. Stellte man in jedem Radarpixel eine Messstation auf, die dieses Pixel abdeckte, enthielte die aufgezeichnete Zeitreihe in sehr vielen Fällen nur wenige Datenpunkte. Dies ist in Abbildung 25 veranschaulicht. Die Karte zeigt für jeden Ort die Summe aller Tage (seit 2002), an denen ein MESHS-Wert  $\geq 2$  cm gemessen wurde. Selbst in den hagelreichen Regionen der Schweiz gibt es an einem einzelnen Ort meist deutlich weniger als 20 Messwerte. Eine lokale statistische Auswertung pro Radarpixel der reinen Beobachtungsdaten liefert daher keine robusten Ergebnisse und lässt aus diesem Grund auch keine verlässliche extremwertstatistische Berechnung zu.

Eine weitere, in der Gefährdungs- und Risikoanalyse der Versicherungs- und Rückversicherungswirtschaft, aber auch in der auswirkungsorientierten («impact-oriented») Klimaforschung verwendete Methode sind probabilistische Resampling-Verfahren (z.B. *Bloemendaal et al., 2020*; *Raynaud et al., 2020*; *Aznar-Siguan and Bresch, 2019*). In Resampling-Verfahren werden beobachtete Ereignisse auf verschiedene Weise vervielfältigt und gegebenenfalls physikalisch plausibel leicht verändert, um neue, zufallsbasierte Ereignisse zu generieren. Im einfachsten Fall werden beobachtete Ereignisse in X- und Y-Richtung ihrer Koordinaten verschoben und/oder rotiert. Indem zum Beispiel ein Extremereignis, das

<sup>1</sup>Für die Berechnung der Wiederkehrperioden standen bis Projektende Daten für die 19 Jahre 2002-2020 zur Verfügung. Für die Klimatologie (siehe Kapitel 4) wurden die Daten bis 2021 erweitert.

über einer wenig besiedelten Region niederging, über eine nahegelegene Metropole «verschoben» wird, kann eine Abschätzung des grössten anzunehmenden Schadens berechnet werden («Was wäre, wenn..?»). Um sicherzugehen, dass Resampling-Ereignisse auch mit der langjährigen Klimatologie und ihren räumlich-zeitlichen Mustern konsistent sind, werden auch weitaus komplexere Verfahren angewendet. Diese berücksichtigen verschiedene Rahmenbedingungen, beispielsweise topographische Grenzen oder Startbedingungen. Dies soll verhindern, dass Ereignisse an Orten oder zu Zeitpunkten generiert werden, wo bzw. zu denen sie meteorologisch-klimatologisch nicht realistisch auftreten würden.

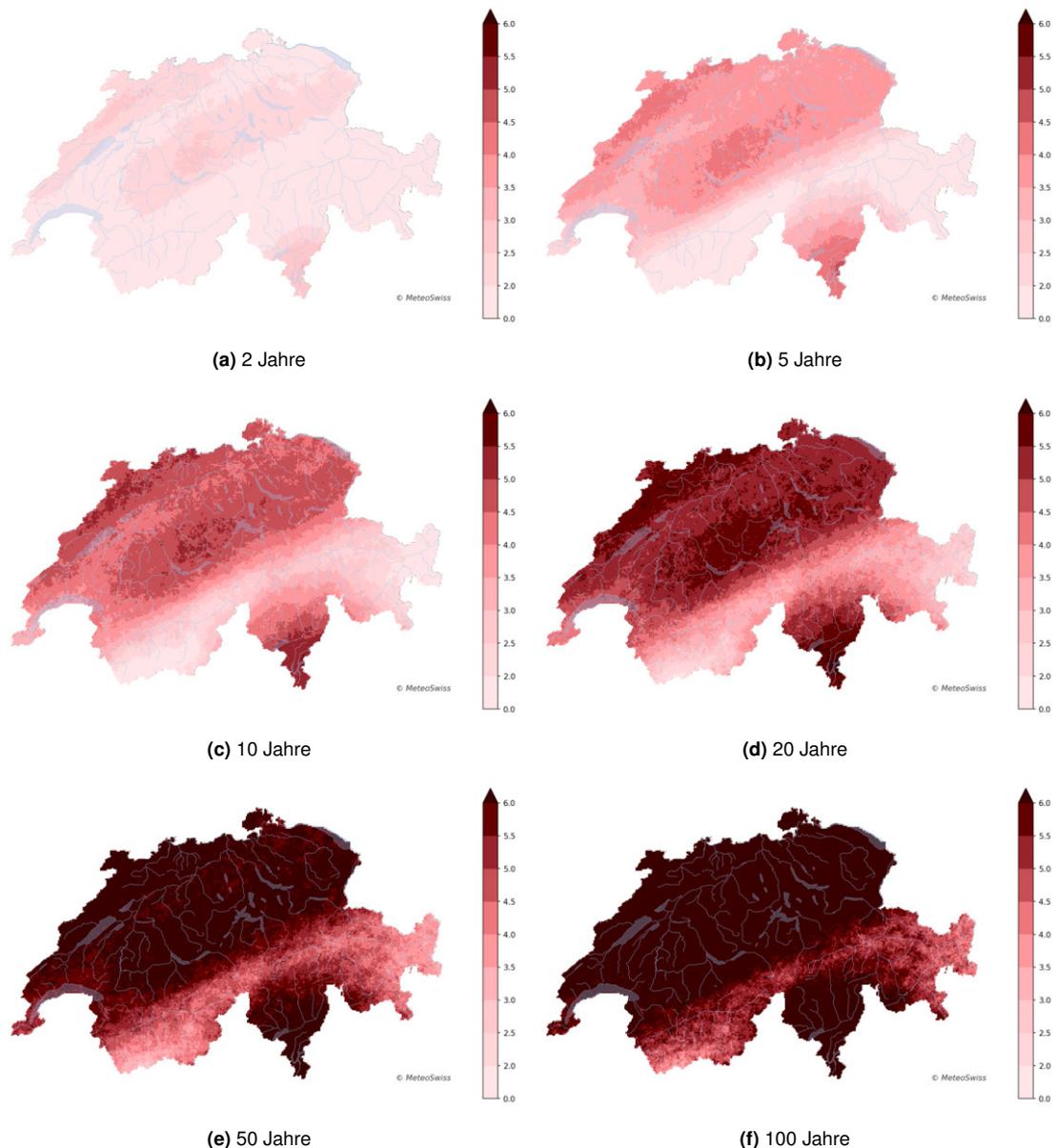
Im Projekt «Hagelklima Schweiz» wurden auf Basis der neuen Radar-Hagelklimatologie erstmals Wiederkehrwerte der Hagelkorngrössen für verschiedene Wiederkehrperioden berechnet. Hierfür wurde ein Resampling-Ansatz entwickelt, der die klimatologischen Rahmenbedingungen des Hagelvorkommens in der Schweiz berücksichtigt. Der Ansatz beruht auf individuellen Zugbahnen und Eigenschaften von über 40'000 vom Radar beobachteten Hagelgewitterzellen (siehe Kapitel 5.3). Die resultierenden Karten der Wiederkehrwerte zeigen für jeden Ort, wie häufig über lange Zeitspannen von mehreren Jahren bis Jahrzehnten statistisch mit bestimmten Korngrössen gerechnet werden muss. Dabei sollen die Resampling-Ergebnisse möglichst konsistent mit der Klimatologie der Beobachtungsperiode (2002-2020) sein. Die Wiederkehrwerte der Hagelkorngrössen werden dabei für verschiedene Wiederkehrperioden berechnet, d.h., 2, 5, 10, 20, 50 oder 100 Jahre.

## 5.1 Wie interpretiert man Wiederkehrperioden?

Eine häufig verwendete Wiederkehrperiode beträgt 100 Jahre. Ein «100-jährliches Ereignis» wird oft fehlinterpretiert als eines, das (nur) «genau einmal alle 100 Jahre» auftritt. Beträgt an einem Ort die ermittelte Hagelkorngrösse für ein 100-jährliches Ereignis (der sogenannte Wiederkehrwert) 4 cm, so beträgt die geschätzte Wahrscheinlichkeit  $p$ , an diesem Ort ein Hagelkorn von 4 cm Grösse zu beobachten jedoch in jedem Jahr aufs Neue 1% ( $p = 1/100 = 0.01$ ). Die Wahrscheinlichkeit, dass in einer Zeitspanne von 30 Jahren mindestens einmal ein solches Hagelkorn auftritt, beträgt immerhin 26%. Dies wird nach den Grundsätzen der Wahrscheinlichkeitstheorie berechnet: In jedem Jahr besteht eine 99-prozentige Wahrscheinlichkeit, dass kein 100-jähriges Ereignis auftritt ( $1 - 1/100 = 0,99$ ). Die Wahrscheinlichkeit, dass über 30 Jahre kein 100-jährliches Ereignis stattfindet, beträgt  $(1 - 0,01)^{30} = 0.74$  also 74%. Die Wahrscheinlichkeit, dass mindestens einmal in dieser Zeit ein solch grosses Hagelkorn auftritt, ist die Gegenwahrscheinlichkeit  $1 - (1 - 0,01)^{30} = 0.26$ , also 26%.

## 5.2 Wiederkehrwerte der Hagelkorngrössen MESHS

Abbildung 23 zeigt die Karten der berechneten Wiederkehrwerte der MESHS-Korngrössen für 2, 5, 10, 20, 50 und 100 Jahr-Wiederkehrperioden (zur Methodik siehe Kapitel 5.3). Die Ergebnisse spiegeln in der grossräumlichen Struktur die Muster der beobachteten Klimatologie wider: Im Südtessin, den nördlichen zentralen Voralpen sowie entlang des Jura sind häufiger grössere Hagelkorngrössen zu erwarten als im nördlichen Mittelland und in den hochalpinen Regionen.



**Abbildung 23:** Karten der Wiederkehrwerte der MESHS-Hagelkorngrösse für Wiederkehrperioden 2, 5, 10, 20, 50 und 100 Jahre. Pro Ort wird die jeweilige Korngrösse über eine Zeitspanne von 2, 5, 10, 20, 50 bzw. 100 Jahren statistisch mindestens einmal erreicht oder überschritten. Wiederkehrwerte sind mit Unsicherheiten behaftet (vgl. Kapitel 5.2.1).

In den Hagel-Hotspots der Schweiz können alle fünf Jahre MESHS-Korngrössen von bis zu 4.5 cm erwartet werden, während in den alpinen Regionen und im nördlichen Mittelland die erwarteten Korngrössen unter 2 cm bleiben. Alle 20 Jahre erreichen die MESHS-Wiederkehrwerte in den Hotspots bereits bis 5.5 cm, statistisch alle 50 Jahre werden auch im Mittelland verbreitet Korngrössen von 6 cm erreicht oder überschritten. Diese Werte werden für 100-jährliche Ereignisse schliesslich auch im etwas weniger betroffenen nördlichen Mittelland und Westen erreicht. Neben den inneralpinen Regionen mit deutlich niedrigerem Risiko für grosse Hagelkorngrössen zeigt sich eine Tendenz zu kleineren Korngrössen bei gleicher Eintrittswahrscheinlichkeit auch im äussersten Westen. Aufgrund der noch dünnen Datenlage an Bodenreferenzdaten ist der MESHS-Algorithmus für Korngrössen über 6 cm mit

Unsicherheiten behaftet und wird daher oberhalb dieser Grenze nicht differenziert (vgl. Kapitel 1.2). Eine Ausnahme stellt die wissenschaftliche Forschung dar, die auch zur Korngrössenvalidierung genutzt wird.

Bei der Interpretation der Wiederkehrperiodenkarten ist zu beachten, dass sich die Aussagen auf die Wahrscheinlichkeit beziehen, dass die gezeigte MESHS-Korngrösse am betrachteten Ort erreicht oder überschritten wird. Es erlaubt keine Aussage darüber, ob und mit welcher Wahrscheinlichkeit diese MESHS-Werte gleichzeitig verbreitet bzw. über grössere Flächen über dem Mittelland auftreten. In jedem Beobachtungsjahr seit 2002 traten irgendwo in der Schweiz MESHS von 6 cm und mehr auf. Der Median<sup>2</sup> der betroffenen Fläche pro Jahr liegt bei 543 km<sup>2</sup> (Interquartilsspanne<sup>3</sup>: 342 km<sup>2</sup>–1068 km<sup>2</sup>). Die Wahrscheinlichkeit, MESHS von mindestens 6 cm an einem ganz bestimmten Ort zu beobachten, ist jedoch um ein Vielfaches geringer, da Hagelgewitter zwar in bestimmten Regionen gehäuft auftreten, jedoch trotzdem selten stets genau dieselben Orte treffen. Die vorliegenden Auswertungen lassen keine Aussage über die Seltenheit der räumlichen Ausdehnung von Hagelereignissen zu, z.B. die Wahrscheinlichkeit dass eine ganze Region gleichzeitig von Hagelkörnern einer bestimmten Grösse getroffen wird. Diese Grössen bedürfen weiterer Analysen, die in zukünftigen Arbeiten mitberücksichtigt werden sollen<sup>4</sup>.

### 5.2.1 Mit welchen Unsicherheiten sind die Wiederkehrwerte behaftet?

Aufgrund des komplexen Wetterphänomens Hagel, der relativ kurzen Datenreihe bei gleichzeitig seltenem Auftreten von Hagel, technisch bedingter Messungenauigkeit und statistischer Annahmen in der Resampling-Methode sind Wiederkehrwerte grundsätzlich mit Unsicherheiten behaftet. Diese Unsicherheiten propagieren vom Algorithmus des MESHS-Modell über lückenhaften Bodengrössenreferenzdaten bis zu Verteilungsparametern in den Resampling-Schritten. Zwar lassen sich für die jeweiligen Analyse-Schritte statistische oder empirische Unsicherheitsbereiche angeben. Aufgrund der Fortpflanzung der Unsicherheiten durch den gesamten Prozess, von der Datenerhebung bis zur Berechnung der Wiederkehrperioden, kann eine Gesamtunsicherheit nicht quantifiziert werden. Im Folgenden werden daher die wichtigsten Aspekte der auftretenden Unsicherheiten kurz beschrieben.

Für die Interpretation von MESHS wird grundsätzlich empfohlen, Werte mit einem Unsicherheitsbereich von  $\pm 0.5$  cm zu interpretieren (siehe Kapitel 3.2.3). Eine MESHS-Korngrösse von 4 cm auf dem Radarbild kann also zwischen 3.5 cm und 4.5 cm liegen. Aufgrund von Winddrift und Zuggeschwindigkeiten kann es ausserdem zu räumlichen Verschiebungen vom Radarsignal gegenüber den Bodenbeobachtungen kommen, welche bis ca. 5 km betragen können (siehe Kapitel 3.2.2). Im Resampling-Verfahren wurden mehrere Sensitivitätsstudien durchgeführt, in denen das Resampling mit leicht veränderten Ausgangsbedingungen der verschiedenen Modellkomponenten durchgeführt wurde. Diese zeigten, dass die Resultate jeweils im Bereich von plus/minus 0.5 cm bis 1 cm schwankten. Die räumlichen Übergangsbereiche der verschiedenen Grössen-Zonen zeigten eine Unsicherheit im Kilometer- bis Zehner-Kilometer-Bereich. Für die Interpretation der Wiederkehrperiodenkarten bedeutet das, dass lokale Wiederkehrperioden immer im Kontext der umliegenden Werte betrachtet werden sollten. Insbe-

<sup>2</sup>Der Median bezeichnet den Wert, über bzw. unter welchem jeweils 50% der Daten liegen. Es wurden also in 10 der 20 Beobachtungsjahre eine mehr als 543 km<sup>2</sup> grosse von MESHS  $\geq$  6 cm betroffene Fläche verzeichnet.

<sup>3</sup>Die Interquartilsspanne entspricht dem mittleren Datenbereich von 25%-75%, innerhalb welchem 50% aller Daten liegen.

<sup>4</sup>Zwar rechnet MeteoSchweiz keine Wiederkehrwerte abhängig der betroffenen Flächen. Jedoch werden die täglich gemessenen Hagelflächen (Gesamtfläche innerhalb der Schweiz, die POH-Werte von 80% erreicht oder überschreitet) über die Beobachtungsperiode ausgewertet und aktuelle Ereignisse in Bezug auf ihre Fläche empirisch in die Zeitreihe aller Tages-Flächen eingeordnet (vgl. Abbildung 16, Kapitel 4.2.3).

sondere bei langen Wiederkehrperioden muss damit gerechnet werden, dass Unsicherheiten jedoch auch wesentlich grösser sein können, da die Ausgangs-Datenlage für die extremsten Ereignisse naturbedingt am dünnsten ist. Die Unsicherheiten, die aufgrund der kurzen Datenreihen und dem Mangel an Boden-Referenzmessungen vorhanden sind, werden erst mit vielen Jahren weiterer Daten aus der systematischen Beobachtung und Analyse zu reduzieren sein.

Eine weitere Quelle der Unsicherheit stellen die möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf die Hagelhäufigkeit und –intensität dar. Für die Schweiz können in dieser Hinsicht aktuell keine gefestigten Aussagen zu Trends und Veränderungen gemacht werden. Die Zeitreihen der 20-jährigen Beobachtungsperiode weisen bei hoher interannueller Variabilität keine zeitlichen Trends in der Häufigkeit oder Intensität der Hagelereignisse auf. Eine Intensivierung starker konvektiver Gewitterniederschläge, ist mittlerweile in Modellen und Beobachtungen konsolidiert. Da Hagel in konvektiven Gewittern auftritt, kann dies ein Hinweis auch auf verstärktes Hagelpotenzial sein. Jedoch sind die Entwicklungen der spezifisch für Hagel relevanten Parameter, wie der Höhe der Nullgradgrenze (relevant für das Wachstum und das Schmelzen von Hagelkörnern), der Windscherung, und der Stabilität der Atmosphäre noch Gegenstand aktueller Forschung. Aktuelle Erkenntnisse zu Hagel im Klimawandel aus globaler Perspektive wurden 2021 von *Raupach et al. (2021)* zusammengefasst.

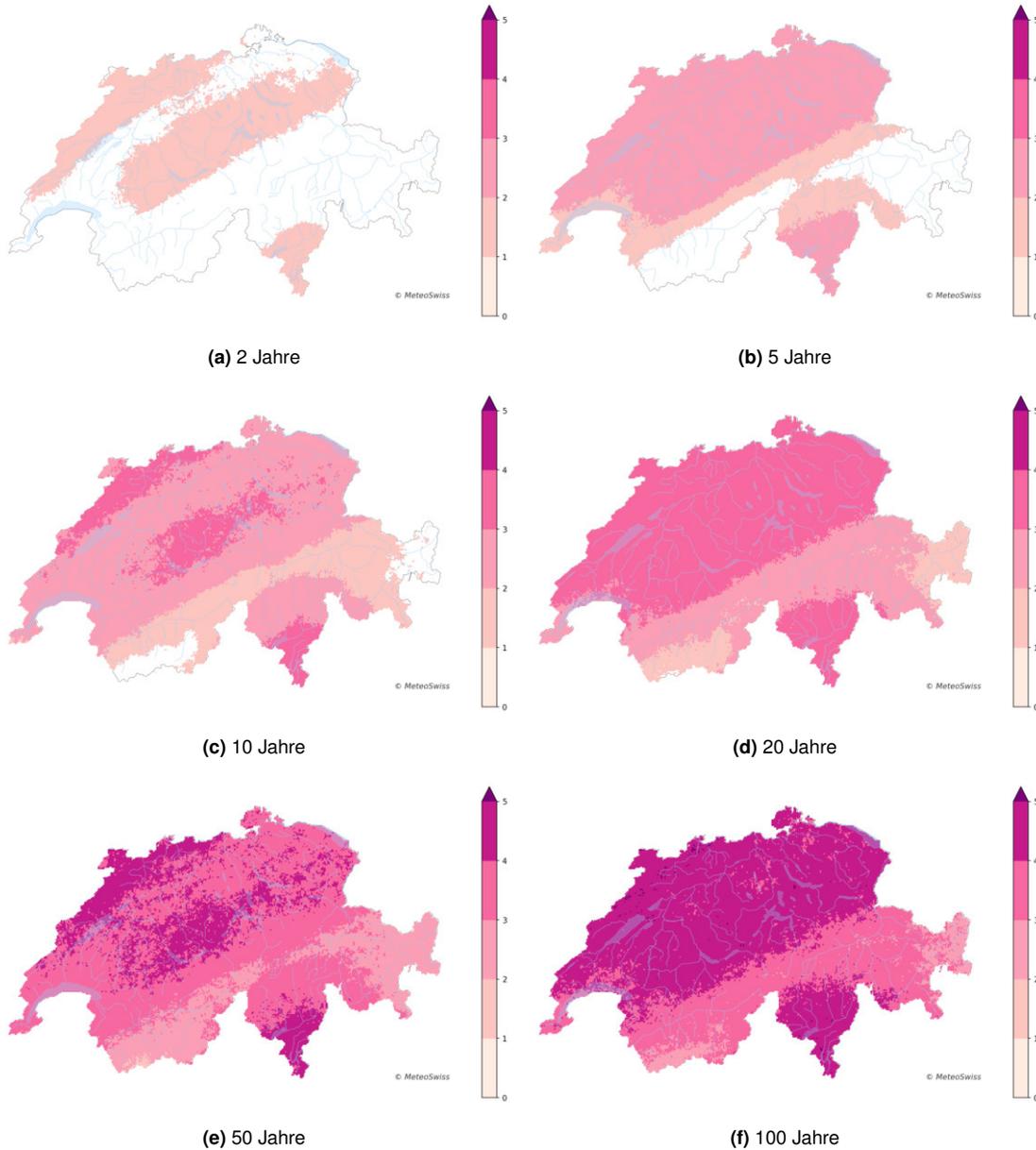
Grundsätzlich ist festzuhalten, dass die Resampling-Methode die aus der kurzen Datenreihe resultierenden Unsicherheiten nicht aus dem Weg räumen kann. Der Ansatz verfolgt das Ziel, mithilfe allen vorhandenen Wissens über die hochaufgelösten Zugbahnen und ihrer Bedingungen vor allem die Auftretenswahrscheinlichkeiten räumlich konsistent und klimatologisch plausibel darzustellen.

### **5.2.2 Besonderheiten der «Gefährdungskarten Gebäudeschutz» basierend auf der Hagelkorngrosse LEHA**

Die Karten der Wiederkehrwerte wurden im Rahmen des Partner-Projektes «Hagelklima Schweiz» auch für die Hagelkorngrosse LEHA mit Referenzfläche 100 m<sup>2</sup> erstellt (Details zu LEHA siehe Kapitel 3.1). Diese werden als «Gefährdungskarten Gebäudeschutz» bezeichnet und sind für die verschiedenen Jährlichkeiten in Abbildung 24 gezeigt.

Wiederkehrwerte von Hagelkorngrossen spielen im Gebäudeschutz eine wichtige Rolle. Im Durchschnitt verursacht Hagelschlag jedes Jahr in der Schweiz Schäden an Gebäuden in der Höhe von 93 Millionen Schweizer Franken (*NCCS, 2021*). Für den Schutz der Gebäude sollen Materialien und Bauweisen ausreichend Hagelwiderstand aufweisen. Für die Gefährdungskarte Gebäudeschutz wurden die Wiederkehrwerte der Hagelkorngrosse der 50-jährlichen Wiederkehrperiode mithilfe der LEHA-Rechenvorschrift (siehe Kapitel 3.1.1) von MESHS in LEHA-100 umgerechnet. Die Referenzfläche von 100 Quadratmetern ist statistisch die kleinste sinnvolle Einheit, sie wurde mit den beteiligten Anspruchsgruppen gewählt und entspricht ungefähr der Grundfläche eines typischen Einfamilienhauses (vgl. Abbildung 6). Laut der 50-jährlichen Gefährdungskarte Gebäudeschutz ist verbreitet mit Hagelkorngrossen von mindestens 3 cm auf der Referenzfläche eines Hausdachs (100 m<sup>2</sup>) zu rechnen (LEHA). Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass die maximale Korngrösse (MESHS) innerhalb eines Quadratkilometers über 6 cm beträgt. Denn MESHS bezeichnet die grösstmöglich vorkommende Grösse pro Radarpixel. Aufgrund der Hagelkorn-Verteilungen im Gewitter kommt diese Maximalgrösse jedoch sehr viel seltener vor als die häufigeren kleinen Grössen (siehe ausführliche Beschreibung im Kapitel 3.1). Die Gefährdungskarte Gebäudeschutz bildet die Grundlage zur Plausibilisierung der

Vorgaben der SIA-Baunorm<sup>5</sup>. Darin wird festgehalten, welcher Hagelwiderstand bei Bauvorhaben mindestens anzustreben ist und welche Massnahmen dafür geeignet sind.

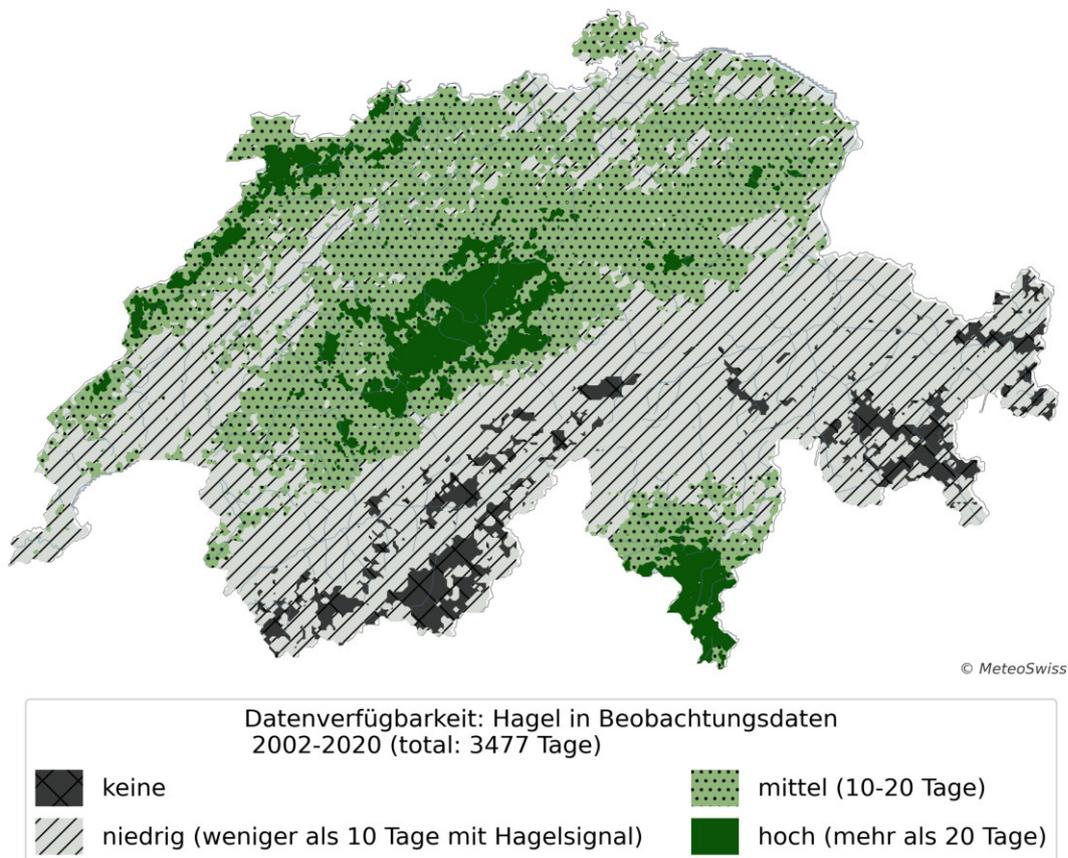


**Abbildung 24:** Karten der Wiederkehrwerte der Hagelkorngrosse LEHA mit Referenzfläche 100 m<sup>2</sup> für Wiederkehrperioden 2, 5, 10, 20, 50, 100 Jahre. Pro Ort wird die jeweilige Korngrosse über eine Zeitspanne von 2, 5, 10, 20, 50 bzw. 100 Jahren statistisch mindestens einmal erreicht oder überschritten. Wiederkehrwerte sind mit Unsicherheiten behaftet (vgl. Kapitel 5.2.1). Eine alternative Darstellung mit zentrierten Klassengrenzen findet sich im Anhang, Abbildung 36.

<sup>5</sup>Norm SIA 261/1 Einwirkungen auf Tragwerke - Ergänzende Festlegungen (2020). Die Karte der Hagelzonen in Anhang G1 der Norm SIA 261/1 (2020) bleibt unverändert gültig (Stand 1.4.2022)

### 5.3 Wie wurden die Wiederkehrperioden berechnet?

Wie eingangs beschrieben, sind für die zuverlässige Berechnung von Wiederkehrperioden sehr lange Messreihen eine der wichtigsten Voraussetzungen. Klimatologische Datenreihen sollten mindestens 30 Jahre umfassen (s. z.B. *Begert, 2008*), für robuste extremwertstatistische Auswertungen oder Trendanalysen für Zeiträume von Jahrzehnten bis Jahrhunderten sollten sie wesentlich länger sein. Gemessen an diesen Standards ist die Zeitreihe der Radarmessungen von Hagel zu kurz. Zusätzlich ist Hagel ein sporadisches Phänomen, es tritt auf einen einzelnen Ort bezogen sehr selten auf, und dauert meist nur einige Minuten. Die Abbildung der Gesamtsumme der Tage mit Hagel pro Ort über die Beobachtungsperiode (Abbildung 25) zeigt, dass es mit Ausnahme der sehr hagelreichen Regionen nur wenige Orte mit ausreichend Daten für eine robuste statistische Auswertung gibt. Die langjährige Auswertung der Messdaten über die gesamte Messzeitreihe ist daher von den einzelnen aufgetretenen Gewitterzellen geprägt. Aufgrund der Natur von Hagelgewittern ist davon auszugehen, dass die Auftretenswahrscheinlichkeiten über lange Zeiträume räumlich homogener sind (siehe z.B. *Winterrath et al., 2017*). Das heisst, dass beim nächsten Gewittertag ein Gewitter auch eine leicht veränderte Zugbahn einschlagen kann als am vorigen. Dieser Zufälligkeit (Stochastizität) sind jedoch topographisch-klimatologische Grenzen gesetzt, die in einem Gebirgsland wie der Schweiz über wenige Kilometer ändern können. Zum Beispiel tritt ein typischer Mittelland-Hagelzug nicht über hochalpinem Gelände auf. Die klimatologischen Karten (z.B. Abbildung 10) zeigen, dass regional durch orographische Hebung (z.B. Jura, Voralpen), sowie auch grossräumig durch die Klimascheide des Alpenkamms (Alpennordseite vs. Alpensüdseite) die grossräumliche Verteilung der beobachteten Hagelgewitter wiederkehrenden Mustern folgt.



**Abbildung 25:** Karte der Anzahl der Tage mit gültigen Hagelmessungen (MESHS-Wert  $\geq 2$  cm) pro km<sup>2</sup> seit 2002. Selbst in den hagelreichen Regionen der Schweiz gibt es an einem einzelnen Ort meist nur wenige Messwerte. Eine statistische Auswertung pro Radarpixel der Beobachtungsdaten liefert daher keine robusten Ergebnisse.

Zur Gefährdungsabschätzung der Hagelereignisse wurde daher ein Resampling-Ansatz verfolgt, der die Zufälligkeit der Hagelzugbahnen auf der einen Seite mit den begrenzenden Rahmenbedingungen auf der anderen verbindet. In dem statistischen Verfahren «Hail Storm Stochastic Resampler» (Hail-StoRe) werden beobachtete Ereignisse stochastisch in einer Weise vervielfältigt, die die beobachteten raumzeitlichen klimatologischen Muster bestmöglich berücksichtigt. Mögliche alternative Zugbahnen werden statistisch modelliert, um so eine bessere räumliche Gefährdungsabschätzung mit dennoch hoher räumlicher Auflösung zu erreichen. Das Resampling-Verfahren wird in mehreren Schritten durchgeführt. Als Grundlage dienen die neuen, für die klimatologische Anwendung re-prozessierten und optimierten MESHS-Radarhagelraten (siehe Kapitel 1) sowie Daten des MeteoSchweiz Gewitterzellentracking-Algorithmus TRT («Thunderstorms Radar Tracking») (Hering *et al.*, 2004, 2008; Nisi *et al.*, 2018). Hochaufgelöste Details einzelner Hagelzüge (sogenannte MESHS-Footprints», siehe Kapitel 5.3.1) werden dann im Zusammenhang mit grossskaligen atmosphärischen Bedingungen aus den MeteoSchweiz Wetterlagen-Klassifizierungen (Weusthoff, 2011) analysiert und stochastisch vervielfältigt.

Basierend auf beobachteten Wetterlagenabfolgen werden zufallsbasiert hypothetische Hagelereignisse in Form von synthetischen Radarhagelfeldern erstellt, welche unter den heutigen Klimabedingungen, aufgrund der Beobachtungen der letzten zwei Jahrzehnte, plausibel auftreten könnten. Die Hage-

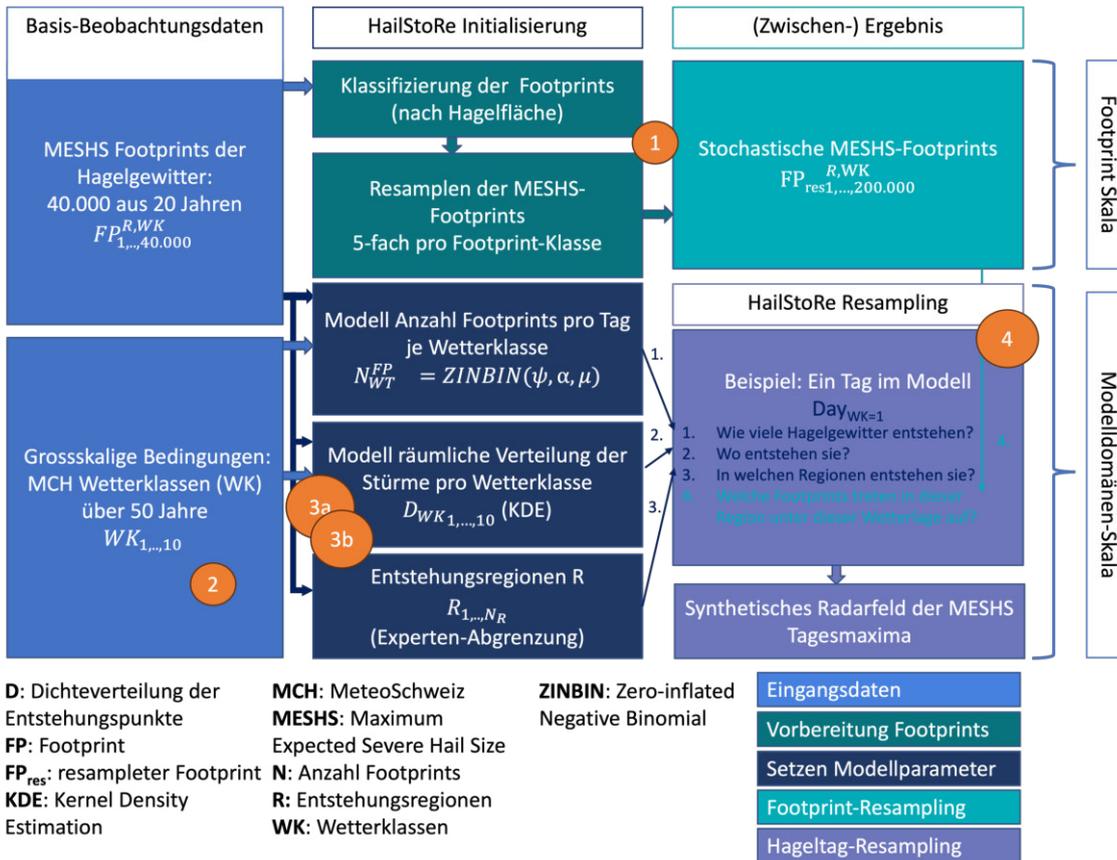
Ereignisse werden in täglicher Auflösung für 1000 mögliche Jahre generiert. Die so simulierten Zeitreihen aus vielen hundert möglichen Jahren des gegenwärtigen Klimas dienen als Grundlage für die Berechnung der statistischen Wiederkehrperioden der Hagelkorngrossen. Es ist wichtig zu beachten, dass die grosse Anzahl an generierten Jahren nicht einer jahrhundertelangen Zeitreihe gleichzustellen ist und die Beobachtungsperiode nicht auf vergangene oder zukünftige klimatische Bedingungen verlängert. Die Vervielfältigung ist vielmehr so zu interpretieren, dass viele zusätzliche, physikalisch plausible Varianten der Ereignisse mit den klimatologischen Bedingungen der Beobachtungsperiode erstellt werden.

Das Resampling-Modell HailStoRe umfasst mehrere Schritte, die hier in ihrer Reihenfolge gelistet sind und im Folgenden beschrieben werden. Abbildung 26 illustriert schematisch die Schritte 1-4.

### **Hail Storm Stochastic Resampling: Schritt für Schritt**

1. Vorbereitung: Erstellen hochaufgelöster MESHS-Footprints aller beobachteten Hagelgewitter seit 2002 und Generieren zusätzlicher Footprints durch Durchmischen der räumlichen Intensitäten der Hagelfootprints nach Flächenklassen (Kapitel 5.3.1)
2. Erstellen bzw. Auswahl der Wetterklassen als Indikator für die grossräumigen Entstehungsbedingungen (Kapitel 5.3.3)
3. Modell Initialisierung
  - (a) Finden der Verteilungsparameter für die Anzahl Hagelgewitter (Kapitel 5.3.2) und der Dichtekarten der räumlichen Entstehungswahrscheinlichkeiten sowie Hagelgewitter-Regionen (Kapitel 5.3.4) für jede Wetterklasse
  - (b) Berechnen der Analog-Hagelgewitter: Erstellen von Footprint-Gruppen je Region und Wetterklasse aus allen resamplierten MESHS-Footprints
4. Modellsimulation: Für jeden Tag der Treiberdaten (=langjährige Datenreihe der Wetterklassen) wird aus den in Schritt 3 bestimmten Wahrscheinlichkeits-Verteilungen ein zufälliger, für diese Bedingungen typischer Tag generiert. Dafür werden die folgedenden Schritte durchlaufen:
  - (a) Grossskalige Bedingungen aus den langjährigen Wetterlage-Daten: «*Welche Wetterklasse herrschte an diesem Tag?*»
  - (b) Zufallsbasierte Modellierung der Anzahl Hagelgewitter je Tag: «*Wie viele Hagelgewitter entstehen typischerweise an einem solchen Tag?*»
  - (c) Zufallsbasiertes Ziehen der Entstehungspunkte aus der räumlichen Dichteverteilung und Bestimmen der Entstehungsregion: «*Wo entstehen die Gewitter und in welche Region fallen die Entstehungspunkte?*»
  - (d) Setzen eines Hagelgewitters aus dem jeweiligen Footprint-Pool für jeden Entstehungspunkt: «*Welche Art Hagelgewitter könnte an diesem Entstehungspunkt entstehen?*»
  - (e) Zusammensetzen des synthetischen MESHS-Gitterdaten-Tagesfeldes aus der Summe aller Hagelgewitter eines Tages: «*Wie sähe das Radarprodukt der Tagesmaxima der MESHS für diesen Tag aus?*»
  - (f) Wiederholen der Schritte 4a – 4e für jeden Tag in den Treiberdaten.

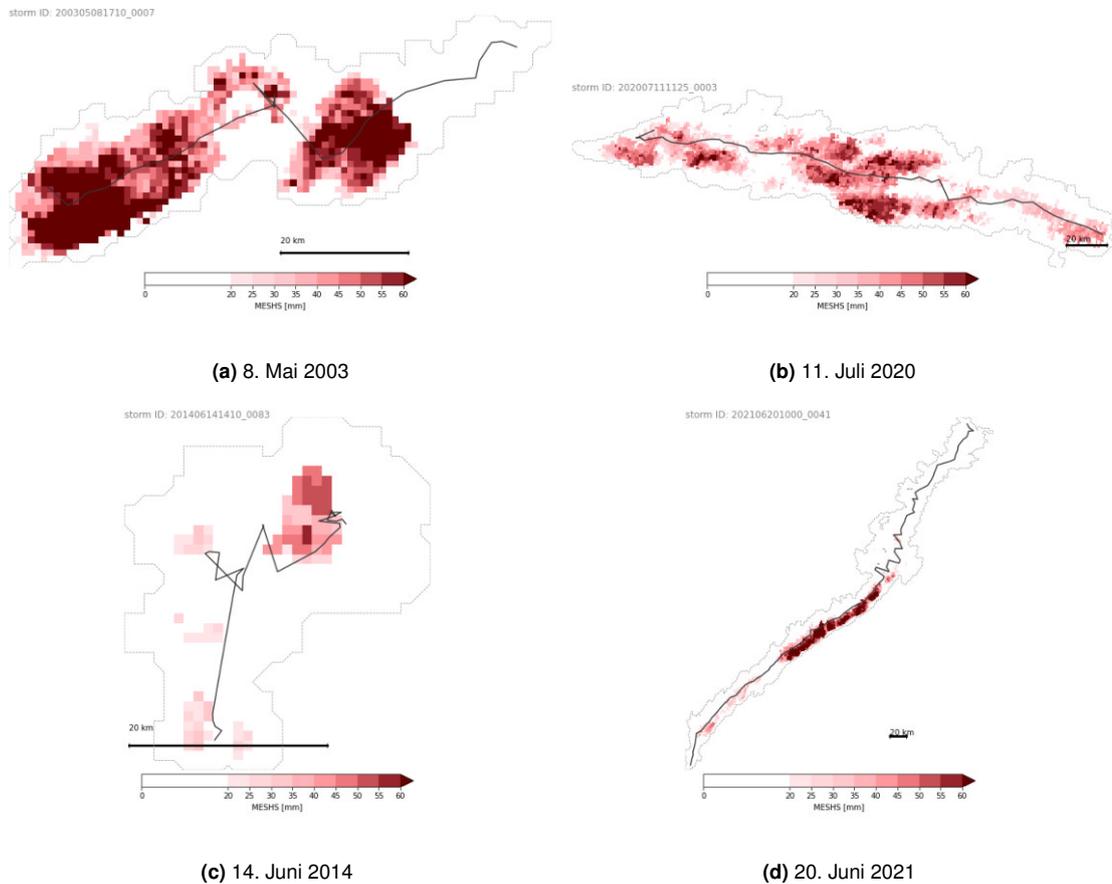
5. Auswertung und Validierung: Vergleich der modellierten Zeitreihen der täglichen MESHS-Gitterdaten mit der Klimatologie der Beobachtungen (Jahresgang der Hageltage, inter-annuelle Variabilität, Anzahl und räumliche Verteilung Hagelgewitter, Hagelkorngrossen u.A.)
6. Bestimmung der Wiederkehrwerte pro Radarpixel mithilfe der Weibull-Formel (Kapitel 5.3.5)



**Abbildung 26:** Schematische Darstellung der Daten und Modellschritte 1-4 im Resampling-Verfahren HailStoRe. Die beschriebenen Schritte 1-4 sind mit orangenen Kreisen verortet.

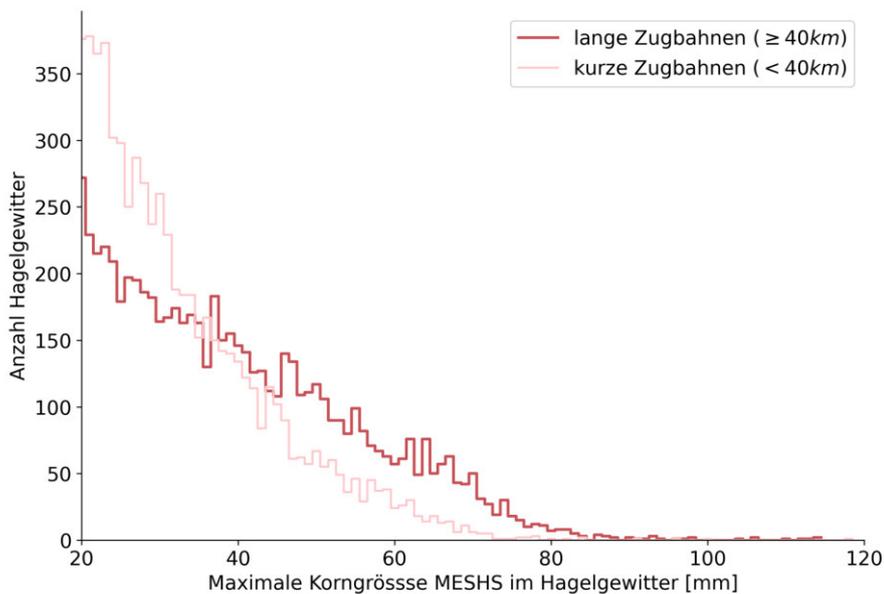
### 5.3.1 Erstellung hochaufgelöster Footprints aller beobachteten Hagelgewitter seit 2002

Grundeinheit im Resampling sind die MESHS-Footprints aller beobachteter Hagelgewitter der Jahre 2002-2020. Als Footprint wird das räumliche Muster der Hagelkorngrossen bezeichnet, der «Fussabdruck», den eine Hagelzelle hinterlässt. Vier Beispiele sind in Abbildung 27 gezeigt. Um diese zu erstellen, wurde jedes der seit 2002 ca. 1.5 Millionen vom MeteoSchweiz Gewittertracking-Algorithmus detektierten Gewitter (zeitliche Auflösung 5 Minuten) codiert und mit den fünf-minütlichen MESHS-Radarhagelaten verschnitten. Insgesamt wurden so über 6.3 Millionen einzelne 5-Minuten Gewitter-Umrisse analysiert und in der Beobachtungsperiode fast 40'000 Hagelgewitter identifiziert. Von diesen betrafen gut 13'200 Schweizer Landesfläche (vgl. schwarze Marker in Abbildung 31). Für jede detektierte Gewitterzelle wird aus allen Einzelumrissen ein eindeutig identifizierbares Hagelgewitter-Objekt erstellt, welches für jedes betroffene Pixel den Maximalwert der aufgetretenen MESHS-Hagelkorngrossen während dieses Gewitters speichert.



**Abbildung 27:** Vier Beispiele von Hagel-Footprints: Umrisse (graue Linien) und Zugbahnen (schwarze Linien), beide aus dem MeteoSchweiz Gewitterzellentracking (TRT) und innerhalb der detektierten Gewitterzelle liegende maximale MESHS-Werte (rot).

Im nächsten Schritt werden die Hagelgewitter nach ihrer MESHS-Fläche (ab 2 cm MESHS-Hagelkorngrößen) sortiert und in Klassen («Hagelgewitter-Gruppen») eingeteilt. So lassen sich Gewitter mit geringerem Gefährdungspotenzial von grossen Gewitterzügen mit erheblichem, räumlich ausgedehnten Gefährdungspotenzial trennen. In Gewitterzellen mit kürzeren Zugbahnen werden im Durchschnitt auch kleinere MESHS-Größen verzeichnet. Abbildung 28 zeigt die Häufigkeit der maximalen Korngrösse in Abhängigkeit der Zugbahnlängen.



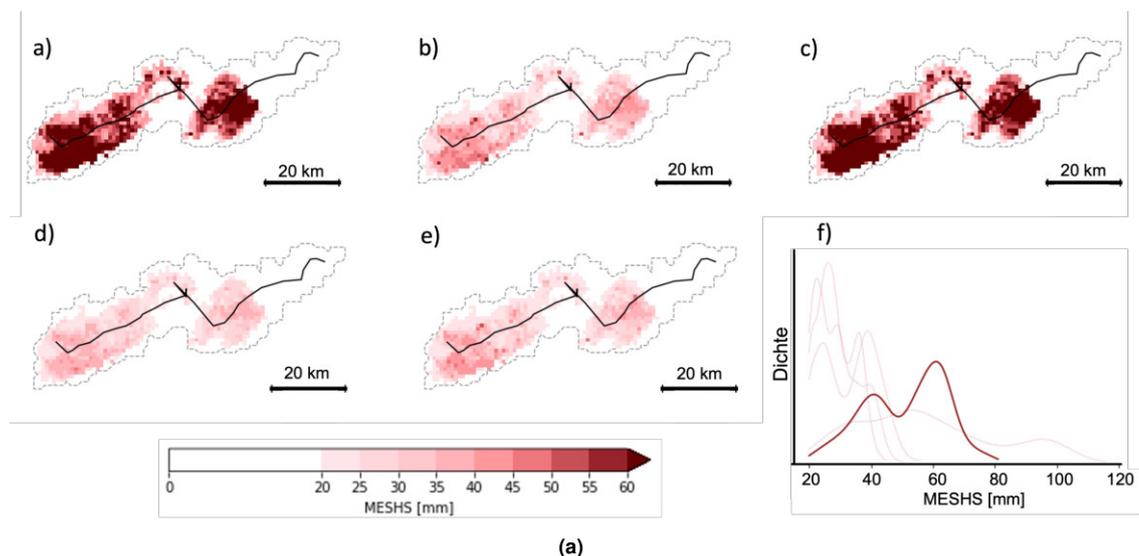
**Abbildung 28:** Verteilung der MESHHS-Hagelkorngrößen in Hagelgewittern mit langen (ab 40 km) und kurzen Zugbahnen (bis 40 km). 40 km entspricht der Median-Zugbahnlänge, d.h. 50% der Zugbahnen sind kürzer und 50% sind länger als dieser Wert. Beide Klassen enthalten also gleich viele Hagelzüge.

**Klassifizieren der Hagelgewitter und klassenweise Vervielfältigung der Footprints** Stochastische Eventsets können mit HailStoRe wahlweise auf Basis der unveränderten beobachteten Footprints aller aufgetretener Ereignisse erstellt werden. Das heisst, während des Resampling werden Gewitter räumlich oder zeitlich perturbiert, die Footprints selber und damit die Korngrößen werden aber nicht verändert. Es können also keine Korngrößen ausserhalb der beobachteten Bandbreite an Werten auftreten. Um auch mögliche Korngrößen ausserhalb der beobachteten MESHHS-Werte darzustellen, können vor dem eigentlichen Resampling auch die Footprint-Objekte selbst stochastisch geresampelt werden. Hierfür werden zunächst mithilfe eines K-Means Clustering Algorithmus alle Hagelgewitter in Gruppen ähnlicher Hagelwirkfläche (Grösse der von MESHHS betroffenen Fläche je Footprint) klassifiziert («Hagelgewitter-Gruppen», siehe oben). Der Einbezug weiterer Charakteristika (z.B. Zugbahnlänge, Gesamt-Gewitterfläche, Tageszeit) ist möglich, zeigte aber in Sensitivitätsstudien keine verbesserte Ausdifferenzierung gegenüber der einfachen Klassifizierung, da die MESHHS-Fläche häufig mit diesen korreliert. Im zweiten Schritt werden für jede der Hagelgewitter-Gruppen statistische Verteilungen angepasst, welche die maximalen MESHHS-Korngrößen in jeder Hagelgewitter-Gruppe parametrisch beschreiben. Dabei werden für jede Hagelgewitter-Gruppe die vier diskreten Häufigkeitsverteilungen negative Binomialverteilung, diskrete Weibull-Verteilung, geometrische Verteilung und Poisson-Verteilung getestet. Für jede Hagelgewitter-Gruppe werden die Parameter der am besten passenden Verteilung gespeichert.

Die Grundgesamtheit der in HailStoRe zur Verfügung stehenden Footprints wird dann auf Basis dieser Verteilungen vervielfältigt. Die räumlichen Eigenschaften innerhalb eines Footprints werden dabei beibehalten, d.h. bei den vervielfältigten Footprints sind gleich viele Pixel betroffen wie beim Original-Footprint. Um plausible Werteverteilungen innerhalb eines Footprints zu erhalten, wird für jeden neu zu generierenden Footprint zunächst ein Maximalwert aus der Verteilung der Maximalwerte aller Footprints dieser Hagelgewitter-Gruppe gezogen ( $MESHHS_{maxZiel}$ ). Ein neuer Footprint wird dann mithilfe

zweier zufällig ausgewählter Hagelgewitter der gleichen Hagelgewitter-Gruppe generiert (Footprint-1 und Footprint-2). Mittels einer Quantil-Transformation wird die beobachtete Werteverteilung des Footprint-2 (=alle vorkommenden MESHS-Werte in Footprint-2; z.B. 50 MESHS-Werte in einem Footprint mit 50 km<sup>2</sup> Hagelfläche) auf das räumliche Ausmass des Footprint-1 transformiert und auf die schliessliche Zielverteilung mit Maximalwert  $MESHS_{max,Ziel}$  skaliert. Abbildung 29 zeigt für einen Beispiel-Footprint das Original und vier stochastisch transformierte Resampling-Footprints.

Auf diese Weise lassen sich zusätzliche, stochastische Footprints generieren, deren Maximalwerte aus den angepassten Verteilungen der beobachteten Maximalwerte der verschiedenen Hagelgewitter-Gruppen stammen. Für die vorliegende Hagelklimatologie wurde die Anzahl der beobachteten Hagelzüge verfünffacht. So können auch Extremwerte aus dem oberen Randbereich der Verteilung gezogen werden. Dank der Quantiltransformation werden die relativen Häufigkeiten und die räumliche Struktur innerhalb der Footprints realistisch gehalten.



**Abbildung 29:** Beispiele für transformierte Footprints. a) Original-MESHS-Footprint aus den Beobachtungsdaten b)-e) vier perturbierte Footprints. Die Maximalwerte der Footprints werden durch eine für diese Footprint-Grössenklasse angepasste Häufigkeitsverteilung beschrieben. f) Häufigkeitsverteilungen des originalen und der resamplen Footprints.

### 5.3.2 Modellierung der täglichen Anzahl Hagelgewitter

HailStoRe generiert für eine tägliche Zeitreihe für jeden einzelnen Tag eine mögliche Anzahl entstehender Hagelgewitter. Über die verschiedenen Wetterlagen werden dabei Unterschiede in den grossskaligen Bedingungen berücksichtigt, die im Kapitel 5.3.3 beschrieben werden. Allen Wetterbedingungen wird das gleiche Basismodell zugrundegelegt, welches die Anzahl Hagelgewitter über der berücksichtigten Domäne abbildet. Lediglich die Parameter ändern je Wetterlage. Dieses Basismodell wird durch eine Negative Binomial-Verteilung mit Nullenüberschuss (zero-inflated) beschrieben. Diese Verteilung beschreibt eine Poisson-Zufallsvariable, deren Ratenparameter gamma-verteilt ist. Die Wahrscheinlichkeitsfunktion lässt sich mithilfe der drei Parameter  $\psi$ ,  $\mu$  und  $\alpha$  wie folgt beschreiben (Salvatier et al., 2016):

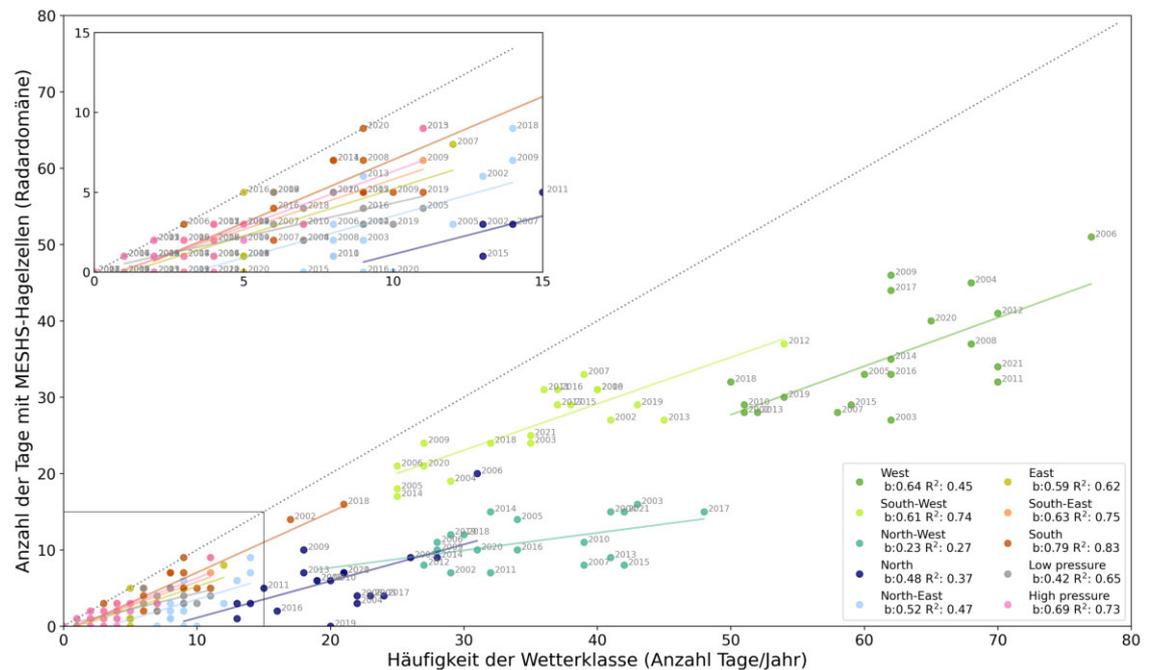
$$f(x | \psi, \mu, \alpha) = \begin{cases} (1 - \psi) + \psi \left(\frac{\alpha}{\alpha + \mu}\right)^\alpha, & \text{if } x = 0 \\ \psi \frac{\Gamma(x + \alpha)}{x! \Gamma(\alpha)} \left(\frac{\alpha}{\mu + \alpha}\right)^\alpha \left(\frac{\mu}{\mu + \alpha}\right)^x, & \text{if } x = 1, 2, 3, \dots \end{cases}$$

Mithilfe des Nullenüberschusses kann der Umstand beschrieben werden, dass unter allen Wetterlagen an vielen Tagen gar kein Hagel entsteht (vgl. auch Abbildung 30). Im HailStoRe Schritt 3a (siehe Übersicht 5.3) wird für jede Wetterklasse eine solche Verteilung an die beobachteten Zahlen der täglichen Anzahl Hagelgewitter angepasst.

### 5.3.3 Auswahl der Wetterklassen und Anzahl der Hagelgewitter je Wetterklasse

Als Ausgangsdaten der Resampling-Modellierung werden im HailStoRe Ansatz tägliche Daten des grossräumigen Wettergeschehens verwendet («Treiberdaten»). Das Ziel ist es, für jeden Tag der verfügbaren Treiberdaten Hagelgeschehen zu generieren, das unter den gegebenen grossräumigen Bedingungen entstehen könnte. Dabei können Treiberdaten verschiedener Quellen genutzt werden, welche sich als klassifizierte Wetterlagen darstellen lassen. Für die vorliegende Wiederkehrperiodenanalyse wurden die MeteoSchweiz Grosswetterlagen seit 1958 verwendet (*Weusthoff, 2011*). Die Klassifizierung «GWT10 500hPa» beruht auf den 500hPa Geopotentialdaten, mit denen die Grosswetterlagen nach 8 Hauptwindrichtungen und Hoch- bzw. Tiefdruckgebieten eingeteilt werden. Diese Klassierung wurde bereits in vorhergehenden Hagelstudien verwendet (u.A. *Nisi et al., 2016, 2018; Barras et al., 2021*). Die «GWT10 500hPa» Grosswetterlagen zeigen keine ausgeprägte Saisonalität. Um den jahreszeitlichen Zyklus der Hagelhäufigkeiten zu berücksichtigen, wird neben der Grosswetterlage auch der Monat als Prädiktor miteinbezogen. Während der Hagelsaison vom 1. April bis zum 30. September treten die Wetterlagen West und Südwest am häufigsten auf, gleichzeitig haben diese Wetterlagen auch den höchsten Anteil an Hageltagen (Abbildung 30). Nordwest- und Nordwetterlagen sind ebenfalls häufig, jedoch ist die Wahrscheinlichkeit, einen Hageltag zu beobachten unter diesen Bedingungen geringer. Die restlichen Wetterlagen treten insgesamt seltener auf. Vor allem in Jahren mit häufigeren Süd-Wetterlagen wurden jeweils auch viele Hageltage verzeichnet.

5 Karten der Wiederkehrwerte



**Abbildung 30:** Häufigkeit der Wetterklassen der MeteoSchweiz Wetterlagenklassifizierung («GWT10 500hPa») und Anzahl der Tage, an denen Hagelzüge mit MESHS auftraten (MeteoSchweiz Radardomäne, 2002-2021, jeweils 1. April bis 30. September). Linien zeigen den einfachen linearen Zusammenhang der Anzahl Wetterklassentage und der Tage mit Hagelzellen je Wetterklasse. Legende: b bezeichnet den Regressionskoeffizienten und R<sup>2</sup> das Bestimmtheitsmass, das den Anteil der erklärten Varianz beschreibt.

Zusätzlich zur beschriebenen Wetterlagenklassifikation «GWT10 500hPa» wurden auch alle übrigen automatisierten Wetterlagenklassifikationen der MeteoSchweiz getestet. Es zeigte sich, dass die Differenzierung der mit Hagel assoziierten Wetterklassen nicht signifikant verbessert wurde. Ein wichtiger zu beachtender Faktor ist ausserdem, dass eine weitere Ausdifferenzierung (z.B. bei Klassifikationen mit 18 und mehr Wetterklassen) eine erhebliche Reduktion der Daten pro Wetterklasse mit sich bringt. Vor allem eine hohe Anzahl «leerer» Wetterklassen, an denen kein Hagel beobachtet wurde, limitiert im weiteren Verfahren die statistische Aussagekraft der angepassten Verteilungen. Durch das Sampling der Hagelhäufigkeiten aus angepassten Verteilungen (siehe Kapitel 5.3.2) wird im Modellierungsprozess der Schwankungsbreite der Häufigkeiten Rechnung getragen.

Neben den automatisierten Wetterlagenklassifizierungen wurden auch zielgerichtete Wettertypisierungen aus ERA-5 Reanalysedaten (Hersbach et al., 2020) als Treiberdaten erstellt und getestet, um hagelspezifische Wetterlagenklassen zu generieren. Hierfür wurden die Drucklevel-unabhängigen ERA-5 Variablen CAPE (convective available potential energy), CIN (convective inhibition), K-Index (Index für Gewitterwahrscheinlichkeit), 2m-Temperatur, 2m-Taupunkttemperatur, potentielle Evaporation, Oberflächendruck, Nullgradgrenze, bzw. der aus diesen abgeleitete Lifted Index (Index für atmosphärische Instabilität) sowie die Windverhältnisse (U- und V-Richtung), Geopotential, Divergenz, relative und spezifische Feuchte, Temperatur auf dem 850 hPa und 500 hPa Level verwendet und Beziehungen zu den Hagelbedingungen hergestellt. Grundsätzlich weisen einige der Variablen (CAPE, K-Index) signifikante Korrelationen mit Hagelauftraten (Hagel ja/nein) auf. Es zeigte sich jedoch keine bessere Differenzierung von starken und schwachen Hageltagen und/oder von regionalen Unterschieden.

Es lässt sich festhalten, dass durch den stochastischen HailStoRe Ansatz die Variabilität durch den

verteilungsbasierten Ansatz des negativen Binomial-Modells mit Nullenüberschuss abgebildet wird. Durch die alternative Wetterlagenklassifikation auf Basis der ERA-5 Daten konnte, bezogen auf den Vergleich der modellierten mit den beobachteten Hagelhäufigkeiten je Wetterklasse, keine Verbesserung des Ergebnisses erzielt werden. Die gewählte stochastische Methode berücksichtigt durch das zufallbasierte Sampling aus den angepassten Verteilungen bereits die Variabilität der Hagelaktivität. In jeder Wetterklasse kann mit den aus Beobachtungsdaten abgeleiteten Wahrscheinlichkeiten sowohl kein Hagel oder auch viele oder nur wenige Hagelgewitter auftreten. Zur Illustration sei ein Beispiel beschrieben: Im Resampling wird für jeden Tag ein Datengitter von MESHS-Tagesmaxima erstellt. An Tag 1 herrscht eine Westwetterlage. In der vorhergehenden Modellinitialisierung wurde eine Verteilung angepasst, die die Anzahl der Hagelgewitter pro Tag in Westwetterlagen beschreibt. Für den Resampling-Tag unter Westwetterlage wird nun aus dieser Verteilung ein zufälliger Wert gezogen. Mit grösserer Wahrscheinlichkeit wird eine Anzahl Hagelgewitter generiert, die nahe am typischsten Wert der in der Vergangenheit unter diesen Bedingungen aufgetretenen Hagelgewitter liegt. Mit entsprechender Wahrscheinlichkeit werden aber ebenso Tage mit gar keinen, oder ungewöhnlich vielen Hagelgewitter modelliert.

Gründe dafür, dass durch Einbeziehen der konvektions-spezifischeren Variablen aus ERA-5 keine Verbesserungen erzielt werden konnten, liegen unter anderem vermutlich auch daran, dass pro Tag für die ganze Schweiz die gleiche Wetterlage gilt, während in Realität räumliche und zeitliche Unterschiede auftreten können, beispielsweise beim Durchgang einer Front von West nach Ost. Um konvektionsspezifische Variablen aus der ERA-5 Reanalyse spezifischer zu nutzen, wäre darüber hinaus ein Regressionsansatz denkbar, welcher die ERA-5 Daten direkt auf die Verteilungsparameter der Modelle für die Anzahl der Stürme bezieht und/oder ein räumlich expliziter Ansatz, der Hagelwahrscheinlichkeiten auf Pixel-Basis modelliert. Hierzu bedarf es jedoch noch grundlegender Forschungsarbeit, um die Treiber der intra- und interannuellen Variabilität von Hagel besser zu verstehen. Diese Fragen sind Gegenstand aktueller Forschung und werden in weitergehenden Projekten bearbeitet (z.B. SNF-Projekt scClim *Bresch et al.*, 2021).

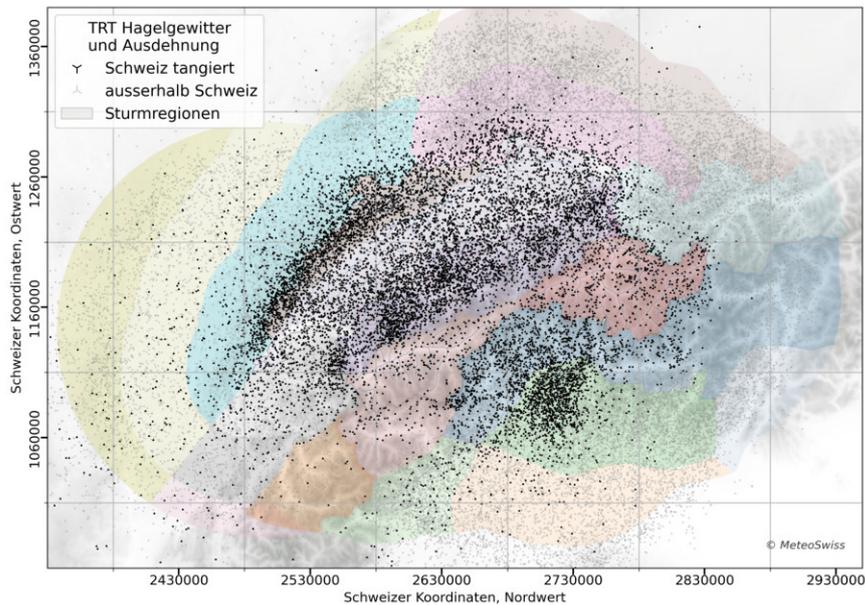
#### 5.3.4 Räumliche Entstehungswahrscheinlichkeiten und Hagelgewitter-Regionen

Nach dem ersten Schritt des Resampling ist festgelegt, wie viele Hagelgewitter an einem Tag in der Modelldomäne entstehen. Im nächsten Schritt wird bestimmt, wo diese entstehen. Hierfür wird eine nicht-parametrische Kerneldichteschätzung genutzt (engl. Kernel-Density-Estimation, KDE). Mithilfe der KDE wird für jede Grosswetterlage eine zwei-dimensionale Dichtekarte aus allen beobachteten Hagelgewitter-Entstehungspunkten erstellt. Nachdem für einen Resampling-Tag die Anzahl der Entstehungspunkte generiert wurde, werden diese gemäss der räumlichen Wahrscheinlichkeiten aller Entstehungspunkte in der Modelldomäne platziert. So «entstehen» Hagelgewitter im Resampling mit entsprechend relativer Wahrscheinlichkeit jeweils dort vermehrt oder vermindert, wo sie bei der jeweiligen Wetterlage auch in den Beobachtungen auftreten.

Die Klimatologie zeigt, dass Hagel in der Schweiz regionalen Mustern folgt. Dies betrifft sowohl die oben beschriebene Häufung von Entstehungspunkten von Gewittern, als auch die Charakteristika der einzelnen Hagelgewitter, zum Beispiel in Bezug auf ihre Hagelfläche. Während im Schweizer Mittelland, am nördlichen und südlichen Alpenrand sowie entlang des Jura häufiger Hagel auftritt, sind vor allem die inneralpinen Gebiete hagelärmer. Wegen dieser klimatologischen Gradienten, aber auch aufgrund der verminderten Radarabdeckung mit grösserer Entfernung von der Radarstation (am Rand der

Radardomäne) werden daher im HailStoRe Resampling verschiedene Hagelgewitter-Regionen unterschieden. Sie verhindern, dass im Resampling Hagelfootprints modelliert werden, die klimatologisch nicht plausibel sind. Zur Abgrenzung dienen zum einen die MeteoSchweiz Prognoseregionen (*MeteoSchweiz*, 2022). Die Prognoseregionen beschreiben klimatologisch zusammenhängende Regionen wie zum Beispiel den Alpennord- und Alpensüdhang, das Mittelland oder die inneren Alpentäler. Zum anderen werden die Regionen ausserhalb der Schweiz, aus denen Hagelzüge in die Schweiz ziehen, mit wachsender Distanz zu den Radarstationen unterteilt. Dies ist notwendig, da besonders sehr lange Hagelzüge bei ihrer ersten Detektion durch den TRT-Algorithmus teilweise noch ausserhalb des Radius der höchsten Qualität für Hageldata liegen (vgl. Kapitel 2.1). Daher können am Rand eines MESHS-Footprints aus diesen Regionen nicht-meteorologische Muster auftreten, welche im Resampling nicht in die zentrale Domäne verschoben werden dürfen. Abbildung 31 zeigt die Regionen sowie alle beobachteten Entstehungspunkte von Hagelgewittern in der Radardomäne. Resamplete MESHS-Footprints können nur in der gleichen Hagelgewitter-Region entstehen, in denen ihr beobachteter Original-Footprint beobachtet wurde. Da eine scharfe Grenzziehung nicht plausibel ist, wird jeweils eine Puffer-Zone von 15 km um jede Region mitberücksichtigt, in der Hagelgewitter-Footprints der jeweils angrenzenden Regionen auftreten können.

**Beispiel:** Für einen Tag werden 30 Hagelgewitter modelliert. Die Entstehungspunkte der Hagelgewitter werden nach der räumlichen Dichtekarte für diese Wetterlage in der Domäne platziert. Für jeden Entstehungspunkt wird gespeichert, in welcher Hagelgewitter-Region sich der Anfangspunkt befindet. An jeden Anfangspunkt wird ein MESHS-Footprint aus der Gruppe aller Hagelgewitter dieser Region zufällig gezogen.



**Abbildung 31:** Karte mit Entstehungspunkten (=Orte der ersten Detektion durch den TRT-Gewitterdetektions-Algorithmus, graue Marker) und Hagelgewitter-Regionen. Schwarze Marker markieren Initialisierungspunkte, deren Zugbahnen die Schweiz kreuzten. Die Hagelgewitter-Regionen sind farblich markiert.

### 5.3.5 Erstellen der Karten der Wiederkehrwerte

Für eine Simulation wird aus allen verfügbaren Jahren der MeteoSchweiz Wetterlagen seit 1958, also den täglichen Abfolgen der Grosswetterlagen der letzten Jahrzehnte, tausend Mal ein zufälliges Jahr als Ausgangsjahr gezogen. Für jeden Tag der konvektiven Saison dieses Jahres werden die Schritte 4a-f (siehe Übersicht 5.3) durchlaufen. So wird für jedes Jahr ein Gitter-Datensatz an täglichen MESHS-Maxima auf der MeteoSchweiz-Radardomäne generiert. Dieses entspricht in seiner räumlichen und zeitlichen Auflösung und dem Datenformat den Beobachtungsdaten der MESHS-Tagesmaxima.

Im Anschluss werden die Häufigkeiten der im synthetischen Datensatz auftretenden Hagelkorngrössen analysiert und Überschreitungswahrscheinlichkeiten berechnet. Auf Basis der grossen Anzahl möglicher Hagel-Jahre werden die Auftretenshäufigkeiten der Korngrössen mithilfe der Weibull-Formel (oder Rang-Methode) bestimmt. Hierfür werden die Jahresmaxima eines jeden Pixels der Radardomäne nach ihrer Grösse absteigend gereiht und ihre Wiederkehrperiode (WKP) berechnet:  $WKP = \frac{n+1}{m}$ , mit  $n$  = Anzahl der Jahre und  $m$  = Rang des Ereignisses, wenn die Daten in absteigender Reihenfolge sortiert sind (Makkonen, 2006). Die Ergebnisse werden in den Karten der Wiederkehrwerte (Abbildung 23) gezeigt. Zur Interpretation von Wiederkehrperioden siehe Kapitel 5.1.

## 5.4 Evaluierung der Resampling Ergebnisse

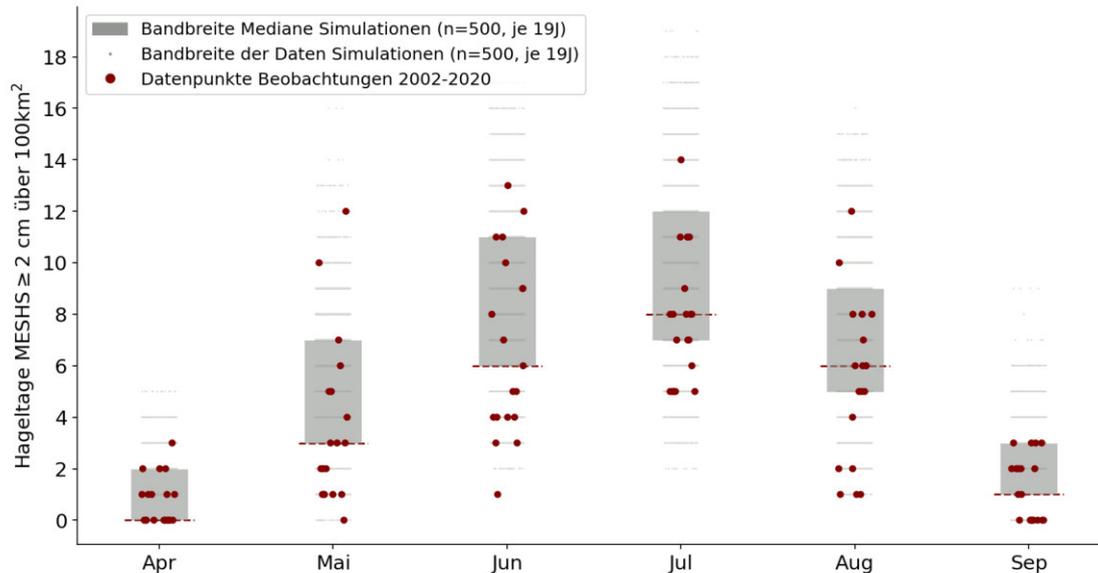
Um zu beurteilen, ob die Simulationen die Beobachtungsdaten klimatologisch plausibel erweitern, werden die Statistiken der modellierten Zeitreihe mit den Statistiken der Beobachtungen (für die 19 Jahre von 2002 bis 2020) verglichen. Dafür werden aus den 1000 simulierten Jahren wiederholt und zufällig 19-Jahr-Perioden gezogen und deren Klimatologie mit der Klimatologie der 19-jährigen Beobachtungsdaten verglichen. Als Vergleichsgrössen wurden unter anderem die Anzahl Hageltage und ihr Jahresgang, die räumliche Verteilung der Hagelgewitter und die **Hagelkorngrössen** analysiert. Insgesamt bildet HailStoRe die Charakteristika des Hagelgeschehens plausibel ab, es werden jedoch auch gewisse Abweichungen verzeichnet. Im Folgenden werden diese Eigenschaften beschrieben.

Das beobachtete Hagelgeschehen über der Schweiz zeigt in den Radarhagelraten der letzten zwei Jahrzehnte eine hohe Schwankungsbreite. Dies zeigt sich sowohl innerhalb des Jahresverlaufs (intra-annuelle Variabilität) als auch zwischen den Jahren (interannuelle Variabilität) sowie in räumlichen Unterschieden (vgl. 4.2.3). Grundsätzlich muss beim Resampling-Ansatz abgewägt werden, inwieweit die Simulation in der Lage sein kann, vielfältige Charakteristika des Hagelgeschehens abzubilden, ohne durch zu viele Randbedingungen eine Überanpassung<sup>6</sup> an die relativ kurzen Trainingsdaten zu riskieren. Im Extremfall führt eine Überanpassung zu einer Reproduktion der beobachteten Ereignisse und verhindert die gewünschte Simulation darüber hinausgehender möglicher, aber bisher nicht beobachteter Ereignisse. Randbedingungen sind jedoch notwendig, denn bei zu grosszügiger Zufälligkeit werden z.B. kleinräumige, aber markante meteorologisch-klimatologische Grenzen, wie sie im Gebirgsland Schweiz vorkommen, nicht abgebildet. Aus diesem Grund werden in HailStoRe beispielsweise die oben beschriebenen Entstehungsregionen oder Footprint-Klassen als Randbedingungen im Resampling berücksichtigt. Während der Entwicklung von HailStoRe zeigte sich, dass Möglichkeiten der weiteren Anpassung vor allem durch die begrenzte Datenmenge limitiert werden. Um zum Beispiel lokale Hotspots abzubilden, sind längere Beobachtungszeitreihen wichtig, die die verfügbare Datenmenge erhöhen. Nur so kann eine zufällige Häufung von Hagelaktivität eindeutig von einer systematischen, lokal-meteorologisch bedingten unterschieden werden und somit statistisch robuste Aussagen getroffen werden. Es ist daher möglich, dass mit dem Verfügbarwerden weiterer Daten auch aus neuen, unabhängigen Messungen (siehe Kapitel 3.2.5 und 3.2.6) eine weitere Ausdifferenzierung von Regionen, Footprints oder Wetterklassen möglich wird. Einhergehend mit weiterer Forschung zum Zusammenspiel des Hagelgeschehens mit den gross- und kleinskaligen atmosphärischen Bedingungen wird dies zu weitergehenden Erkenntnissen und einer verbesserten Darstellung führen.

**Jahresgang der Hageltage** Abbildung 32 zeigt die Bandbreite des Jahresgangs der Hageltage aus den Beobachtungen und simulierten Zeitreihen. Der Jahresgang wird im Allgemeinen gut abgebildet, jedoch wird die mittlere Frequenz der Hageltage mit MESHS ab 2 cm im Resampling-Datensatz leicht überschätzt. Die Anzahl Hageltage wird gemäss der Definition in Kapitel 4.2.1 über die Gesamtfläche der Pixel mit Radarhagelsignal berechnet. Sie ist unabhängig von der Anzahl Hagelgewitter aus dem Gewitterzellentracking. Der Blick auf die einzelnen Hagelgewitter weist auf die Ursache der häufigeren Hageltage im Resampling. Im Vergleich zur Beobachtungsperiode treten in den simulierten 19-Jahr Perioden schwache Hageltage mit nur einem oder wenigen Gewittern häufiger auf. Moderate Tage mit einer mittleren Anzahl Gewittern sind dagegen seltener als in den Beobachtungen. Die

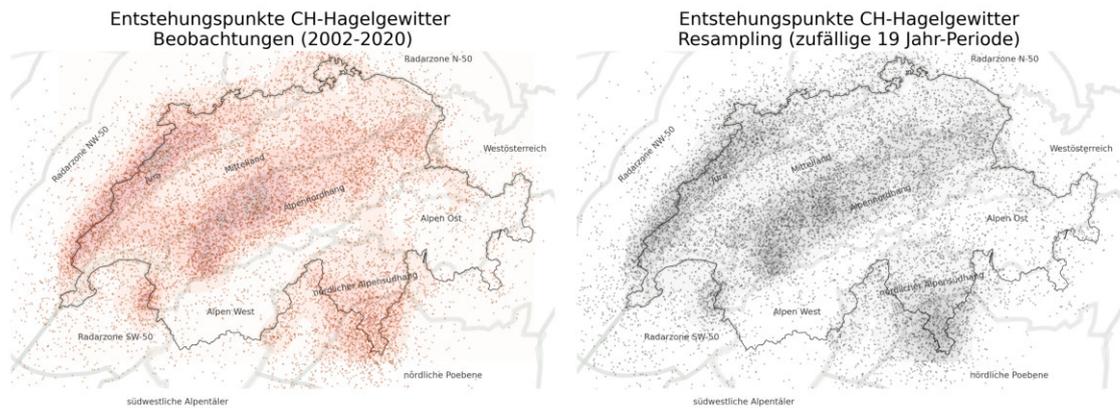
<sup>6</sup>Überanpassung, engl. overfitting, bezeichnet eine Situation, in der ein Modell zu eng an die Trainingsdaten (Beobachtungsdaten) angepasst wird. Dies kann zum Beispiel dadurch passieren, dass zu viele erklärende Variablen einbezogen werden oder zu viele Sonderfälle deklariert werden. In der gegenteiligen Situation, einer Unteranpassung, werden relevante Prozesse oder Variablen nicht berücksichtigt und es kommt ebenfalls zu einer verringerten Modellgüte.

Frequenz einzelner extremer Tage mit sehr vielen Hagelgewittern wiederum wird gut abgebildet. Für die Berechnung der Wiederkehrperioden sind die MESHS-Jahresmaxima ausschlaggebend, also das grösste beobachtete MESHS-Hagelkorn pro Ort und Jahr. Die Verteilung der Hagelgewitter auf die Anzahl Tage ist bei plausibler jährlicher Gesamtzahl an Hagelgewittern für die Wiederkehrperioden der Hagelkorngrossen daher nicht direkt relevant, weist jedoch auf weiteres Entwicklungspotenzial in der Modellierung dieser Prozesse hin.

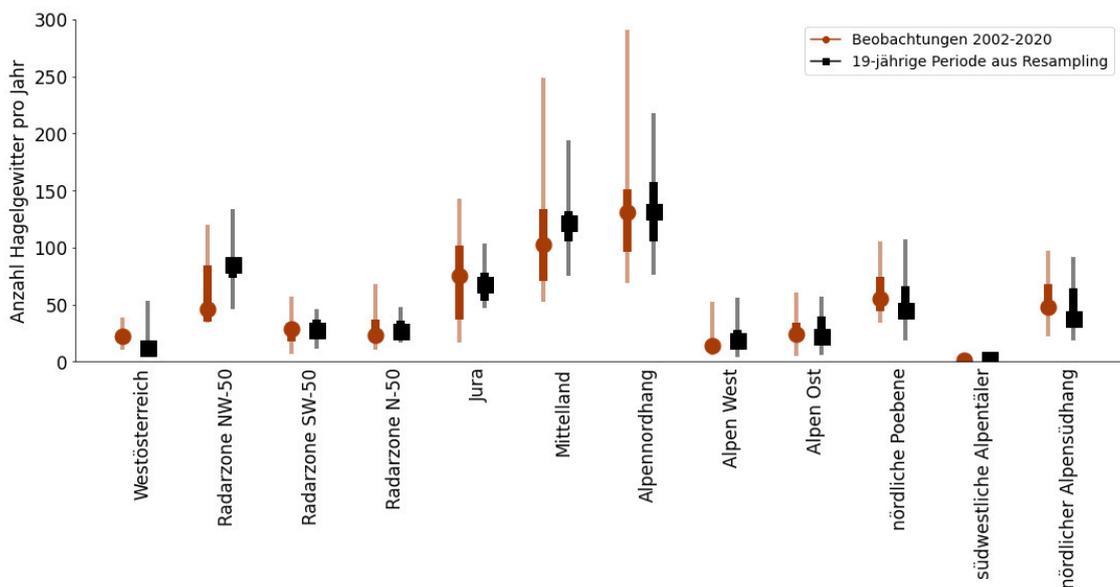


**Abbildung 32:** Vergleich des Jahresgangs der Hageltage ab 2 cm in den Beobachtungsdaten (19 Jahre 2002–2020, rote Punkte) und 500 zufällig ausgewählter 19-Jahr Perioden aus allen Resampling-Jahren. Rote getrichelte Linien kennzeichnen den Median der Anzahl Tage aus den 19 Beobachtungsjahren, graue Boxen kennzeichnen die Bandbreite der Mediane der zufällig ausgewählten Resampling-Klimatologien.

**Räumliche Muster** Die räumliche Verteilung der Entstehungspunkte aller Hagelgewitter wird im Resampling gut abgebildet (siehe Abbildung 33 als Beispiel einer Realisierung). Abbildung 34 zeigt die Anzahl Hagelgewitter pro Jahr aggregiert für verschiedene Regionen. Die Unterscheidung der hagelreichen und hagelarmen Regionen wird in den Simulationen relativ zu den Beobachtungen gut abgebildet. Die interannuelle Variabilität der Anzahl Hagelgewitter wird für die sehr hagelreichen Regionen Mittelland und Alpennordhang sowie Jura unterschätzt. Dies resultiert vor allem aus einer Unterschätzung der durchschnittlich höheren mittleren Anzahl an Hagelgewittern in der ersten Hälfte der Beobachtungsperiode (vor 2011/2012). Es kann daher nicht ausgeschlossen werden, dass auch die seit 2012 gestiegene Qualität des Radarnetzes hier eine Rolle spielt (vgl. Kapitel 2.4). Die Datenreihe ist zu kurz, um den Übergang von mehr Hagelzellen in der ersten Hälfte der Radardatenreihe zu weniger Hagelzellen in der zweiten Hälfte mit Gewissheit klimatologischen oder durch den Wechsel der Radargeneration begründeten technischen Einflüssen zuzuweisen. Auch hier werden vor allem weitere Beobachtungsjahre neue Erkenntnisse bringen und diese Unsicherheit verringern.



**Abbildung 33:** Vergleich der räumlichen Dichte der Entstehungspunkte in den Beobachtungsdaten (links, rot) und einer zufälligen 19-Jahr-Periode aus allen Resampling-Jahren (rechts, grau). Die Abbildung ist beispielhaft für eine Durchführung, der Vergleich wird jeweils für 19-Jahr-Perioden vielfach wiederholt. Es werden die Entstehungspunkte von MESHS-Footprints verglichen, die die Schweiz betreffen.



**Abbildung 34:** Vergleich der Statistik der Anzahl MESHS-Footprints je Entstehungsregion aus Abb. 31. Beobachtungsdaten (19 Jahre 2002–2020, rot, Kreis) und eine zufällige 19-Jahr-Periode aus allen Resampling-Jahren (grau, Quadrat). Es werden die MESHS-Footprints verglichen, die die Schweiz betreffen. Die Symbole (Kreis und Quadrat) kennzeichnen den Median, dicke Linien die Interquartilsbreite und dünne Linien die gesamte Datenstreuung. Die Abbildung ist beispielhaft für eine Durchführung, der Vergleich wird jeweils für 19-Jahr-Perioden vielfach wiederholt.

**Langjährige Variabilität** Im Resampling wird die intra-annuelle Variabilität dadurch berücksichtigt, dass die Abfolge der täglichen Wetterklassen je Resampling-Jahr übernommen wird und so persistente Wetterlagen auch im Resampling erhalten bleiben. Dies gilt jedoch nicht für die interannuelle Variabilität, da die Jahre im Resampling zufällig ausgewählt werden. Die Beobachtungsdaten lassen die Hypothese zu, dass es mehrjährige Zeitspannen mit erhöhter oder verringerter Hagelaktivität geben kann. Über die atmosphärisch-dynamischen Prozesse und Treiber, welche die interannuelle Variabilität steuern, ist zum heutigen Kenntnisstand jedoch noch wenig bekannt. Diese Fragen werden in

aktuellen, interdisziplinären Forschungsprojekten (z.B. *Bresch et al.*, 2021) adressiert. Für die stationäre<sup>7</sup> Berechnung der Wiederkehrwerte ist die Abbildung der interannuellen Variabilität, bei gleicher Gesamtvarianz, jedoch nicht ausschlaggebend, da alle Jahre unabhängig ihrer Reihenfolge in die Berechnung einfließen.

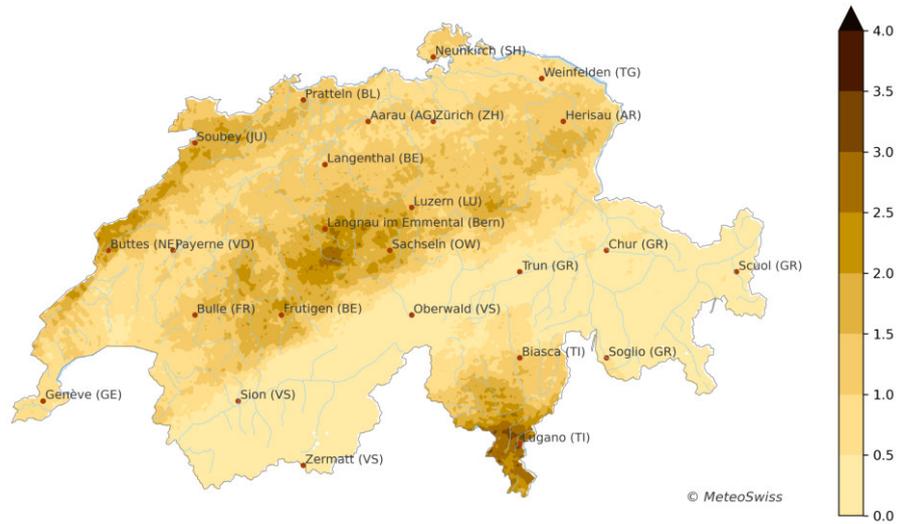
**Hagelkorngrossen** Die Hagelkorngrossen stellen die relevante Grösse für die Wiederkehrperioden dar. Sie werden im Resampling über die MESHS-Footprints abgebildet, die an die simulierten Entstehungspunkte gesetzt werden (vgl. Schritt 4d in Kapitel 5.3).

Abbildung 35 zeigt für klimatologisch unterschiedlich von Hagel betroffene Orte der Schweiz Zeitreihen der MESHS-Jahresmaxima. Einerseits aus den Beobachtungsdaten, sowie aus zufälligen 19-Jahr-Perioden der Resampling-Daten. So kann evaluiert werden, ob mithilfe des Resampling ein Hagelklima dargestellt wird, in welchem die Beobachtungen eine plausible Realisation dieser Annahmen sein können. Die Abbildungen 35 (b-z) zeigen jeweils die örtlichen 19 Jahresmaxima nach ihrer Grösse sortiert, d.h. das grösste beobachtete bzw. im Resampling simulierte Korn wird ganz rechts auf Rang eins eingetragen, das kleinste entsprechend ganz links auf Rang 19.

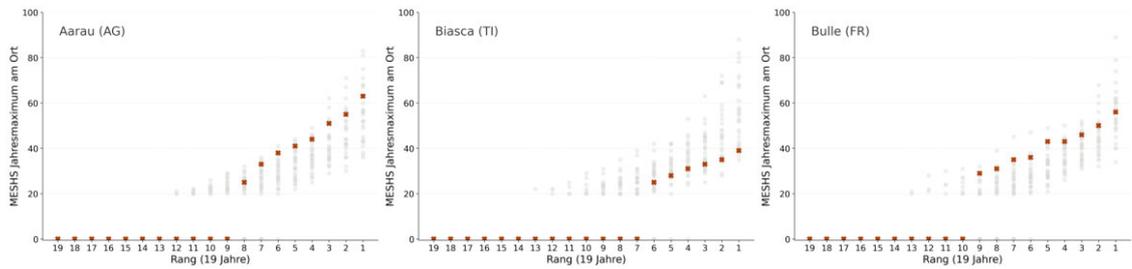
Die Daten zeigen, dass sich die Korngrossen-Werte in plausiblen Bereichen befinden. Je nach Region unterscheiden sich die Muster. So gibt es Bereiche, in denen die Beobachtungen jährlich im oberen Bereich der Resampling-Daten liegen (Pratteln (BL), Soubey (JU), Lugano (TI)). Das heisst, dass im Resampling grosse Korngrossen tendenziell seltener auftreten als in den Beobachtungen. In anderen Regionen (z.B. Neunkirch (SH), Payerne (VD), Langenthal (BE)) liegen die Beobachtungen eher am unteren Ende der Resampling-Daten, d.h. es treten im Resampling öfter Hagelgewitter mit grossen Korngrossen auf, als in den Beobachtungen. Für Herisau (AR), Buttes (NE), und Luzern (LU) liegen die Beobachtungsdaten im mittleren Bereich der Resampling-Klimatologie. Die kleine Anzahl Hageljahre in den Beobachtungen führt dazu, dass eine Interpretation immer auch tendenziell bleibt, denn die wahre langjährige Häufigkeit bleibt unbekannt. Zwar lassen sich die Abweichungen dahingehend interpretieren, dass für die oben erwähnten Regionen die Hagelkorngrossen jeweils eher unter- bzw. überschätzt werden. Es kann jedoch nicht mit Sicherheit festgestellt werden, wie «normal» oder «aussergewöhnlich» die Beobachtungszeitreihe der letzten 19 Jahre relativ zur langjährigen zugrundeliegenden (unbeobachteten) Klimatologie war.

Grundsätzlich sind Abweichungen dieser Art zu erwarten, da durch den Resampling-Ansatz mit grossskaligen Treiberdaten (Wetterklassen über der gesamten Modellregion) die Hagel-Frequenz räumlich homogener wird. Für lokale Hotspots spielen mutmasslich Prozesse eine wichtige Rolle, welche über wenige Kilometer wirken und die noch Gegenstand aktueller Forschung sind (z.B. *Schwyn*, 2021); und aktuell noch nicht berücksichtigt werden können.

<sup>7</sup>Stationarität bezeichnet einen statistischen Zustand, in dem eine Variable oder ein Prozess invariant gegenüber der Zeit ist. Insbesondere sollten bei Annahme von Stationarität im betrachteten Zeitraum keine langjährigen Trends in Klimazeitreihen vorliegen. Die 19-jährige Zeitreihe der Hageldaten zeigt keine statistisch robusten zeitlichen Trends.



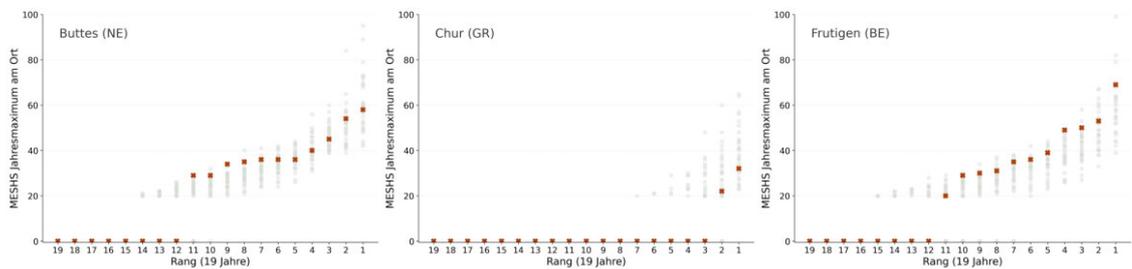
**(a)** Orte der ausgewählten lokalen Zeitreihen. Hintergrund: Karte der durchschnittlichen jährlichen Anzahl Hageltage in der Schweiz (vgl. Abbildung 10)



**(b)** Aarau (AG)

**(c)** Biasca (TI)

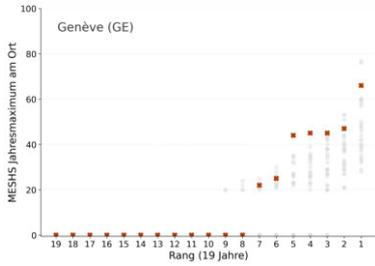
**(d)** Bulle (FR)



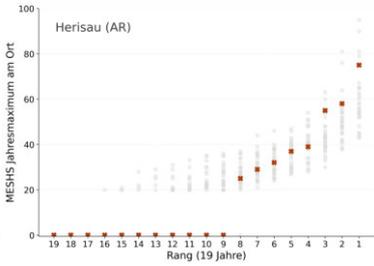
**(e)** Buttes (NE)

**(f)** Chur (GR)

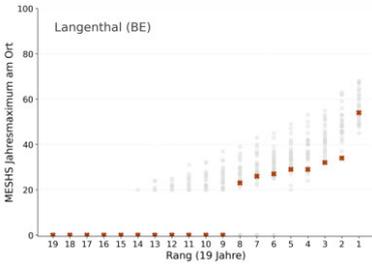
**(g)** Frutigen (BE)



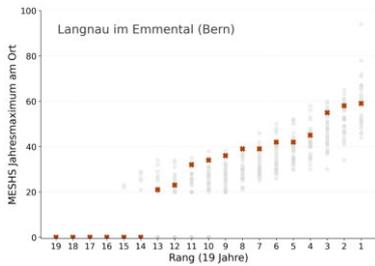
(h) Genf (GE)



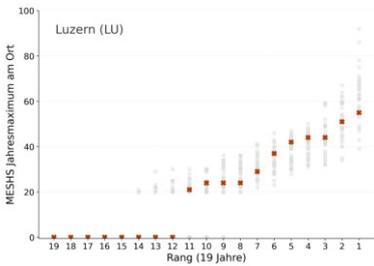
(i) Herisau (AR)



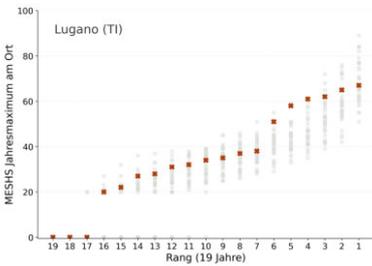
(j) Langenthal (BE)



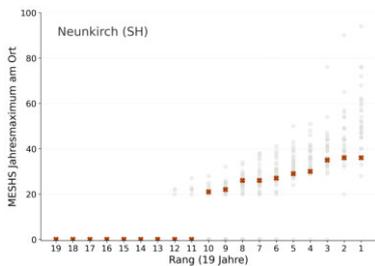
(k) Langnau i. Emmental (BE)



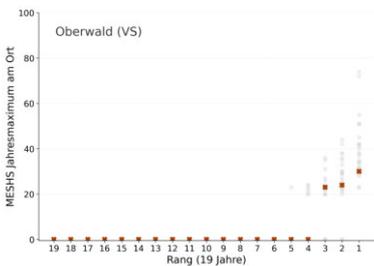
(l) Luzern (LU)



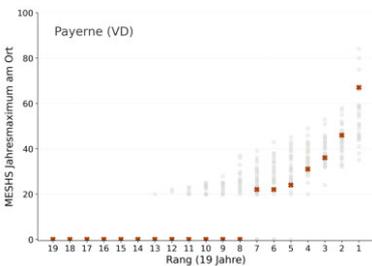
(m) Lugano (TI)



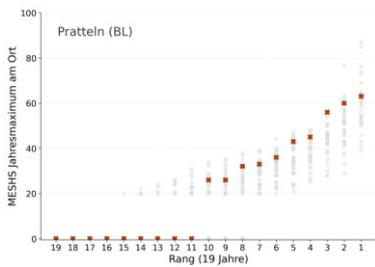
(n) Neunkirch (SH)



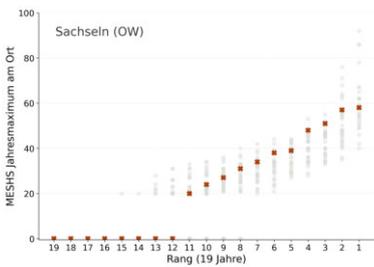
(o) Oberwald (VS)



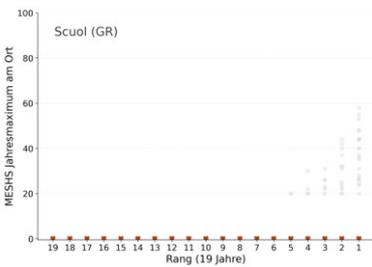
(p) Payerne (VD)



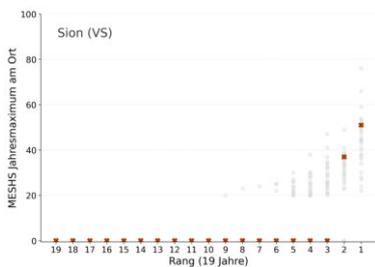
(q) Pratteln (BL)



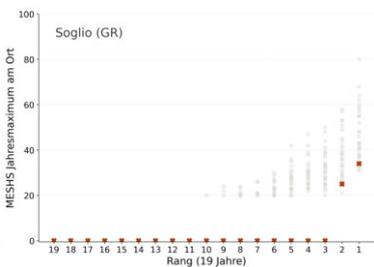
(r) Sachseln (OW)



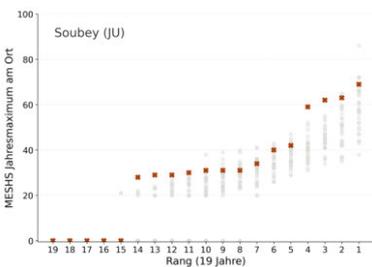
(s) Scuol (GR)



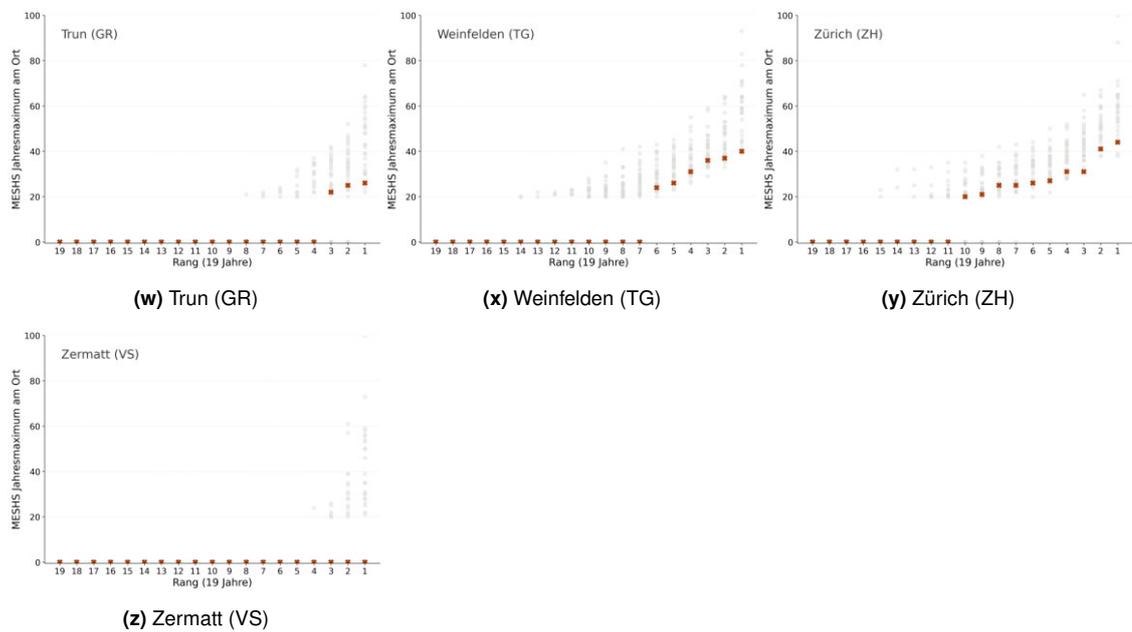
(t) Sion (VS)



(u) Soglio (GR)



(v) Soubey (JU)



**Abbildung 35:** (b-z) Lokale Jahresmaxima der Beobachtungsdaten (rot) und je 30 zufälliger 19-Jahr Perioden aus den Resamplingdaten für zufällig ausgewählte Standorte in der Schweiz (a). Die Jahresmaxima bilden die Grundlage für die Berechnung der Wiederkehrperioden.

#### 5.4.1 Vergleich mit Auswertungen historischer Hagelereignisse seit 1800

In einem begleitenden Projekt wurde durch die Meteotest AG eine umfassende Aufbereitung und Digitalisierung von Hageldaten des vorhergehenden Jahrhunderts aus historischen Archiven durchgeführt (Müller and Schmitz, 2021). Die Hagelinformationen wurden aus den Aufzeichnungen der Schweizer Hagelversicherung, weiterer Versicherungs-Archive, sowie aus den MeteoSchweiz Annalen<sup>8</sup> geborgen, wie zum Beispiel die historische Karte der Hagelfrequenzen von 1909. Die Ergebnisse lieferten für das Projekt «Hagelklima Schweiz» eine wertvolle historische Referenz, um die neu erstellte, radarbasierte Hagelklimatologie der Schweiz auch für längere Zeiträume zu plausibilisieren.

Im Gegensatz zu der zwar längeren, aber inhomogenen, nicht immer quantitativen und manchmal unvollständigen historischen Datenreihe aus Archiven, beruht die neue Referenzkarten der Hagelklimatologie, die im Projekt «Hagelklima Schweiz» erstellt wurden, auf den umfassend geprüften und reprozessierten, räumlich wie zeitlich konsistenten und flächendeckenden Daten des Schweizer Wetterradarnetzes, die seit 2002 zur Verfügung stehen (siehe Kapitel 1). Ein Vergleich mit historischen Datenquellen ist sinnvoll, da für klimatologische Studien eines seltenen Phänomens wie Hagel die Länge der Datenreihe gegen ihre langjährige Homogenität abgewogen werden muss. Der Vergleich mit den historischen Hageltagen aus Archiven zeigen, dass die neue nationale Hagelklimatologie auch bezüglich der Bandbreite der historisch dokumentierten Ereignisse repräsentativ ist.

Die Ähnlichkeit der Ergebnisse bezüglich der grossräumigen Gliederung und der Wiederkehrwerte von Hagelkorngrossen, die aus unterschiedlichen Datensätzen sowie unabhängigen Methoden erstellt wurden, weisen darauf hin, dass sich die langjährige Gefährdung – bei hoher interannueller Variabilität – in den letzten Jahrzehnten nicht grundsätzlich verändert hat. Die Referenz der historischen Datenarchive stärkt das Vertrauen, dass die neue Hagelklimatologie der Schweiz auch für längere Zeiträume eine robuste Gefährdungsabschätzung darstellt.

Auch die Dokumentation extremer Hagelkorngrossen, wie das dokumentierte Auftreten eines Hagelkorns der Grösse von 13 cm in der Schweiz (siehe Kapitel 4.3.1), liefert wichtige Referenzpunkte für die neue Hagelklimatologie. Die räumlichen Muster der Hagelregionen und Hagel-Hotspots in der Schweiz zeigen eine gute Übereinstimmung der historischen mit den neuen Radarhageldaten. Erwartungsgemäss wurden in Vor-Radarzeiten signifikant weniger Hageltage verzeichnet, als nach Verfügbarwerden der schadenunabhängigen, flächendeckenden Radarmessungen. Dieser Sprung zeigt sich deutlich in der Aufarbeitung der historischen Daten. Ein direkter quantitativer Vergleich bzw. eine Analyse der interannuellen zeitlichen Schwankungen der neuen Hagelklimatologie mit den anekdotischen historischen Daten ist daher nicht zielführend. Seit 2002 stimmen die räumlichen Muster der aufgearbeiteten Archive und der neuen Schweizer Hagelklimatologie, weitestgehend überein, da beiden Datensätzen die Daten des MeteoSchweiz Wetterradarnetz zugrundeliegen. Für Details zur Aufarbeitung der historischen Hagelschadendaten sei auf den Abschlussbericht der Meteotest AG (Müller and Schmitz, 2021) verwiesen.

<sup>8</sup>Die Annalen der MeteoSchweiz stehen im Schweizer Wetterarchiv unter <https://www.meteoschweiz.admin.ch/wetter/wetter-und-klima-von-a-bis-z/wetterarchiv-der-schweiz.html> zur Verfügung

## 6 Fazit

Die Ergebnisse des Projekts «Hagelklima Schweiz» stellen einen signifikanten Fortschritt für die Gefährdungsbeurteilung Hagel in der Schweiz dar. Mit der veröffentlichten Hagelklimatologie konnte MeteoSchweiz gemeinsam mit den Projektpartnern die Datengrundlage vereinheitlichen und als zentrale Referenz für die Schweiz zur Verfügung stellen. Durch die Berechnung von Wiederkehrwerten von radar-basierten Hagelkorngrössen wurden ausserdem neue Möglichkeiten für die Gefahrenprävention geschaffen. Gleichzeitig sind auch viele Impulse für weitergehende Forschungsarbeiten zu Hagelvorkommen und -intensität in der Schweiz entstanden.

Daten und Karten zum täglichen, monatlichen und jährlichen Hagelvorkommen in der Schweiz sind nun regelmäßig für betroffene Sektoren sowie für die breite Öffentlichkeit verfügbar und werden kontinuierlich aktualisiert. Die zeitnahe Verfügbarkeit stellt sicher, dass Nutzerinnen und Nutzer stets auf aktuelle Informationen zugreifen können. Die Hagelinformationen haben bereits bei den Stakeholdern Anklang gefunden und können dabei helfen, Normen und Richtlinien für den Schutz vor Hagel auf einer aktuellen und einheitlichen Wissensbasis zu gestalten.

Ausserdem werden in laufenden Forschungsprojekten offene Fragen, die während des Projekts «Hagelklima Schweiz» aufgetaucht sind, wissenschaftlich bearbeitet. Ein Beispiel ist das umfassende Forschungsprojekt scClim (Seamless coupling of kilometer-resolution weather predictions and climate simulations with hail impact assessments for multiple sectors), in dem ein grosses Konsortium Schweizer Forschungsinstitutionen sowie auch MeteoSchweiz als Partnerin interdisziplinär zusammenarbeiten (*Bresch et al., 2021*). Die Ergebnisse dieser Forschung werden wiederum dazu beitragen, die Grundlagen auch in Zukunft weiter zu verbessern und verbleibende Unsicherheiten zu verringern. So konnte das «Hagelklima Schweiz» Projekt wesentlich dazu beitragen, auch die wissenschaftliche Diskussion voranzutreiben und neue Wege für die Risikoanalyse zu eröffnen.

Die erfolgreiche Umsetzung markiert einen wichtigen Punkt in der inhaltlichen und methodischen Weiterentwicklung von Hagel-Gefährdungskarten. Die Ergebnisse bieten nicht nur eine verbesserte Grundlage für Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträger im Bereich der Ereignisbewältigung und Gefahrenprävention, sondern legen auch den Grundstein für künftige Innovationen und Entwicklungen auf diesem Gebiet.

## Danksagung

Im Projekt «Hagelklima Schweiz» haben sich verschiedene Akteurinnen und Akteure aus dem privaten und öffentlichen Sektor unter Leitung des Bundesamtes für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz zusammengeschlossen. Mit dem Zusammenschluss konnte Fachwissen aus der Praxis, der Verwaltung und der Forschung gebündelt und somit ein Mehrwert für die an Hagelinformationen interessierten Nutzerinnen und Nutzer geschaffen werden. Von der intensiven Zusammenarbeit profitierten alle Projektpartner:

- Präventionsstiftung der Kantonalen Gebäudeversicherungen PS
- Schweizerischer Versicherungsverband SVV
- Schweizerische Hagel-Versicherungs-Gesellschaft Schweizer Hagel
- Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA
- Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz
- Bundesamt für Umwelt BAFU
- Bundesamt für Landwirtschaft BLW
- Bundesamt für Bevölkerungsschutz BABS

Wir danken insbesondere den Fach- und Steuerungsgruppen bestehend aus Dörte Aller, Christof Appenzeller, Bernard Belk, Stefan Brem, Pascal Forrer, Philippe Gyarmati, Mirco Heidemann, Markus Imhof, Martin Jordi, Hansueli Lusti, Antoine Magnollay, Olivia Martius-Romppainen, Gunthard Niederbäumer, Stefan Ritz, Ueli Salvisberg, Tiziana Speckert, Luzius Thomi und Christoph Werner für die gute und intensive Zusammenarbeit, Markus Kalisch und Lukas Meier vom Seminar für Statistik der ETH Zürich für ihre Beratung, Thomas Lanz für die wertvolle Mitarbeit während seines Praktikums sowie den Kolleginnen und Kollegen der MeteoSchweiz für die fachliche und technische Unterstützung. Markus Imhof, Dörte Aller, Claudio Hauser und Jan Wüthrich danken wir für den externen Review dieses Fachberichts.



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

**National Centre for Climate Services NCCS**  
**Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz**  
**Bundesamt für Umwelt BAFU**  
**Bundesamt für Landwirtschaft BLW**  
**Bundesamt für Bevölkerungsschutz BABS**

**ASA | SVV**  
Schweizerischer Versicherungsverband  
Association Suisse d'Assurances  
Associazione Svizzera d'Assicurazioni  
Swiss Insurance Association

**VKG** Vereinigung Kantonalier  
Gebäudeversicherungen  
**AECA** Association des établissements  
cantonaux d'assurance

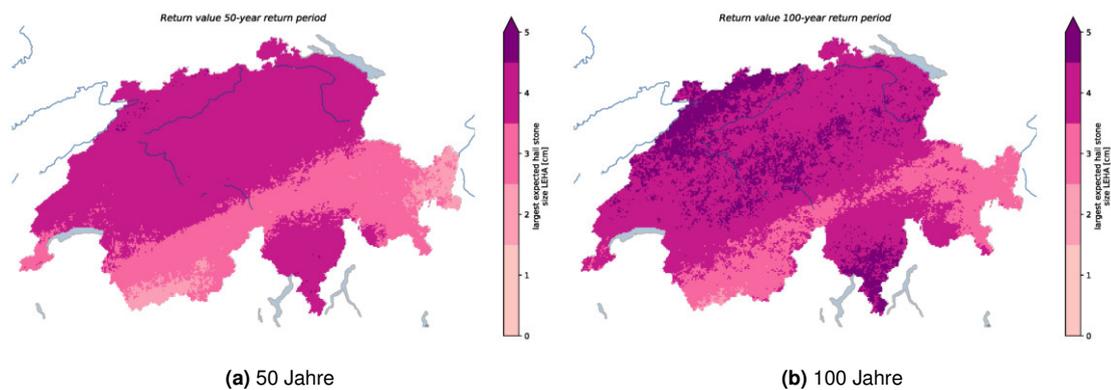
**Schweizer Hagel**  
**Suisse Grêle**  
**Grandine Svizzera**

**sia**  
schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein  
société suisse des ingénieurs et des architectes  
società svizzera degli ingegneri e degli architetti  
swiss society of engineers and architects

## Anhang

### Wiederkehrwerte LEHA mit zentrierten Klassengrenzen

Je nach Anwendung helfen bei der Interpretation andere Klassengrenzen bei der Kartendarstellung, zum Beispiel wenn die Korngrößen zentriert dargestellt werden. Hier sind beispielhaft die Karten der 50- und 100-jährigen LEHA Wiederkehrwerte gezeigt, analog Abbildung 24 e) und f).



**Abbildung 36:** Analog Abbildung 24, aber mit zentrierten Klassengrenzen. Karten der Wiederkehrwerte der Hagelkorngrösse LEHA mit Referenzfläche  $100 \text{ m}^2$  für Wiederkehrperioden 50 und 100 Jahre. Pro Ort wird die jeweilige Korngrösse über eine Zeitspanne von 50 bzw. 100 Jahren statistisch mindestens einmal erreicht oder überschritten. Wiederkehrwerte sind mit Unsicherheiten behaftet (vgl. Kapitel 5.2.1).

## Abkürzungen

HailStoRe	engl.: Hail Storm Stochastic Resampler (Resampling Methode für Hagelereignisse über der Schweiz auf Basis von Radarhagel- und Gewittertrackingdaten)
LEHA	engl.: Largest Expected Hailsize on a reference Area of a given size (grösste zu erwartende Hagelkorngrosse auf einer Referenzfläche von gegebener Grösse)
MESHS	engl.: Maximum Expected Severe Hail Size (maximal zu erwartende Hagelkorngrosse)
POH	engl.: Probability of Hail (Hagelwahrscheinlichkeit)
TRT	engl.: Thunderstorms Radar Tracking (Gewitterzellentracking-Algorithmus der MeteoSchweiz)

## Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1 Die Antenne der MeteoSchweiz Radare vollzieht alle 5 Minuten 20 volle Umdrehungen bei Elevationswinkeln zwischen minus 0.2 und plus 40 Grad. Die Krümmung der Radarkeulen ist eine Folge der Erdkrümmung und der Beugung der Radarwelle in der Atmosphäre. Auf den tiefsten drei Elevationen -0.2, 0.4 und 1.0 Grad werden Echos bis zu Distanzen von 246 Kilometern erfasst und ausgewertet, bei den höheren Elevationswinkeln bis etwas mehr als 150 km, respektive bis zu einer Höhe von 18 km. Eine zuverlässige Ableitung der Hagelgrössen POH und MESHS ist bis 150 km Distanz möglich. . . . . 11
- Abbildung 2 Auf La Dôle steht der Wetterradar der MeteoSchweiz in unmittelbarer Nähe von Flugsicherungs-Anlagen der skyguide. Die Zeichnung zeigt die Situation im 2010, vor der Erneuerung des Wetterradars im Projekt Rad4Alp im 2011. Bei tiefen Elevationswinkeln in den Richtungen Südwesten und Nordosten (Azimut 26° bis 38°) wurde das Signal des Wetterradars durch Anlagen der Flugsicherung abgeschattet. Im Projekt Rad4Alp wurde die Antenne des Wetterradars um zwei Meter erhöht und das Hindernis im Südwesten abgebaut. . . . . 13
- Abbildung 3 In zwei Regionen ist die Qualität der Radarhageldaten leicht tiefer als in der übrigen Schweiz: Auf La Dôle wird der Radarstrahl durch ein naheliegendes Gebäude in Richtung Nordosten teilweise abgeschattet. Als Folge davon können Hagelgewitter in einem schmalen Band entlang der französischen Grenze etwas weniger genau vermessen werden. Im östlichen Teil Graubündens ist die Qualität leicht tiefer wegen der zunehmenden Distanz zu den Radarstationen. Dies bezieht sich auf die Situation mit den drei Radaren Albis, La Dôle und Monte Lema. Mit der Erhöhung der Antenne des Wetterradars auf La Dôle (2011) und der Inbetriebnahme von zwei zusätzlichen Stationen auf der Pointe de la Plaine Morte (2014) und dem Weissfluhgipfel (2016) im Rahmen des Projektes Rad4Alp konnten diese Beeinträchtigungen weitgehend behoben werden. . . . . 14
- Abbildung 4 Oben links ein Gewitter mit nur kleinen bis mittelgrossen Hagelkörnern. Oben rechts ein Gewitter, welches das Wachstum von Hagel stärker begünstigt und entsprechend auch grössere Hagelkörner hervorbringt. Unten die entsprechende Korngrössenverteilung. . . . . 16
- Abbildung 5 MESHS gibt den Durchmesser des grösstmöglichen Hagelkornes innerhalb eines Quadratkilometers an. Das LEHA-Diagramm erlaubt die Transformation auf kleinere Referenzflächen. LEHA-100 beispielsweise gibt das grösste zu erwartende Korn auf einer Fläche von 100 Quadratmetern an. Für jeden MESHS-Wert erhält man einen Wert für LEHA-100. Gehen wir als Beispiel von einem MESHS-Wert von 6 Zentimetern aus. Daraus leitet sich ein LEHA-100-Wert von 3.8 cm, oder gerundet, 4 cm ab. Natürlich kann auf den 100 Quadratmetern auch das 6 Zentimeter Korn einschlagen, aber die Wahrscheinlichkeit dafür ist sehr klein. . . . . 18

- Abbildung 6 Die Abbildung illustriert den Unterschied zwischen MESHS und LEHA. Das Radarprodukt MESHS gibt eine Grössenordnung des grössten Hagelkornes an, welches auf Grund der dreidimensionalen Radarmessungen und der Temperaturschichtung innerhalb eines Quadratkilometers denkbar ist. Es bezieht sich auf die Skala eines Quadratkilometers. Die Wahrscheinlichkeit, dass dieses grösste Korn innerhalb eines Quadratkilometers gerade auf ein Hausdach oder ein Fahrzeug fällt, ist klein. Deshalb wurde für Anwendungen rund um Hagelschäden an Gebäuden und Fahrzeugen die Grösse LEHA definiert, welche über eine Rechenvorschrift, dem LEHA-Diagramm, aus MESHS abgeleitet wird. LEHA bezieht sich auf eine kleinere Skala, zum Beispiel ein Hausdach von 100 Quadratmetern (LEHA-100). LEHA-100 ist eine Schätzung des grössten Hagelkornes, welches auf einer Fläche von 100 Quadratmetern typischerweise zu erwarten ist. In der Abbildung hat das grösste Hagelkorn innerhalb des Quadratkilometers einen Durchmesser von 6 Zentimetern. Daraus leitet sich für LEHA-100 gemäss dem LEHA-Diagramm ein Durchmesser von 3.8 Zentimeter ab. In der Abbildung hier wurde der Wert auf 4 cm gerundet. . . . . 19
- Abbildung 7 Die Zeichnung zeigt vereinfacht und mit überhöhtem Relief zwei Hagelzüge vom 12./13. Juli 2011. Weiss eingezeichnet die Flächen, welche gemäss Radar von Hagel betroffen waren. Der westliche Hagelzug hatte seinen Anfang in der Region von Delémont (ausserhalb der Zeichnung), zog nach Osten und endete am Bözberg. Der etwas östlicher gelegene Hagelzug startete bei Zofingen, zog Richtung Ostnordosten und hinterliess einen langen Hagelteppich, der sich bis in die Region von Winterthur zog. Die Zahlen geben zur Illustration die Korngrösse in Zentimetern einiger ausgewählter Hagelfunde am Boden an. . . . . 23
- Abbildung 8 Vergleich der über die App gemeldeten Korngrössen (crowdsourcing) mit den entsprechenden MESHS-Werten der Jahre 2018-2020. Die Balken zeigen für jede App-Korngrössenklasse die Verteilung der entsprechenden MESHS-Werte in der Form eines sogenannten Boxplots. Eine ausführliche Beschreibung der Daten, Methoden und Resultate findet sich in der Publikation von *Barras et al.* (2019). Die grösste Klasse der 68er muss mit Vorsicht interpretiert werden; es sind nur gerade 17 Datenpunkte und sie enthält trotz Qualitätsfilterung allenfalls noch vereinzelte Jux-Meldungen. Für weitere Angaben und Analysen wird auf die Masterarbeit von *Noti* (2016), die Publikationen von *Barras et al.* (2019) und *Trefalt et al.* (2018) sowie die Dissertation von Héléne Barras (*Barras, 2021*) verwiesen . . . . . 24
- Abbildung 9 Tageszeit (Koordinierte Weltzeit UTC, volle Stunden) des ersten Hagelsignals für alle detektierten Hagelgewitter in der Radardomäne der MeteoSchweiz der Hagelsaisonen 2002–2021. In den frühen Morgenstunden wird ein Minimum verzeichnet. 28
- Abbildung 10 Karte des langjährigen Mittels (2002-2020) der Anzahl der jährlichen Hageltage in der Schweiz. Ein Hageltag wird als solcher definiert, wenn die Hagelwahrscheinlichkeit Probability of Hail POH während mindestens 5 Minuten 80% erreicht oder überschreitet. . . . . 29
- Abbildung 11 Einzeljahre (Kreise) und Statistik (Boxplots) des Jahresgangs der Anzahl monatlicher Hageltage ( $POH \geq 80\%$  über mind. 100 km<sup>2</sup>) in der Schweiz über die Jahre 2002 bis 2021. . . . . 30

Abbildung 12	Langjähriges Mittel (2002-2020) der Anzahl der monatlichen Hageltage in der Schweiz für die Monate der konvektiven Saison April bis September. . . . .	31
Abbildung 13	Standardabweichung der Anzahl der monatlichen Hageltage in der Schweiz für die Monate der konvektiven Saison April bis September über die Jahre 2002-2021. . . . .	32
Abbildung 14	Anzahl Hageltage (ab POH 80%, 100 km <sup>2</sup> ) pro Jahr (oben) und pro Monat (unten) seit 2002 über die Monate April-September 2002–2021. . . . .	33
Abbildung 15	Anzahl Hageltage in der Schweiz mit mindestens 4 cm Hagelkorngrosse MESHS über mind. 100 km <sup>2</sup> pro Jahr (oben) und pro Monat (unten) seit 2002 über die Monate April bis September 2002–2021. . . . .	34
Abbildung 16	Tägliche Hagelfläche ab POH 80% (oben) und ab MESHS 4 cm (unten) seit 2002 über die Monate April-September 2002-2021. Die fünf Tage mit dem grössten betroffenen Flächenausmass über dem jeweiligen Schwellwert sind mit Rangzahlen indiziert. Horizontale Linien zeigen die mittlere betroffene Fläche pro Tag je Jahr. . . . .	35
Abbildung 17	Anzahl jährlicher Hageltage 2002 bis 2021. Dunklere Farben bedeuten mehr Hageltage. Die Karten und Daten der Hageltage aller Jahr und Monate (April–September) sind über <a href="http://www.meteoschweiz.ch">www.meteoschweiz.ch</a> verfügbar. . . . .	36
Abbildung 18	Abweichungen der Anzahl jährlicher Hageltage vom langjährigen Mittel für die Jahre 2002 bis 2021. Die Anomalien werden aus den Gitterdaten der Anzahl Hageltage pro Jahr berechnet. . . . .	37
Abbildung 19	Langjähriges Mittel der Hagelereignisse mit mindestens 2 cm Korngrösse MESHS (a, links) bzw. 4 cm Korngrösse MESHS (b, rechts). Achtung: unterschiedliche Skalierung der Farbtabelle. . . . .	38
Abbildung 20	Maximale jährlich beobachtete Hagelkorngrossen MESHS 2002 bis 2021. Dunklere Farben bedeuten grössere Hagelkorngrossen. Die Karten und Daten der maximalen Hagelkorngrossen aller Jahr und Monate (April-September) sind über <a href="http://www.meteoschweiz.ch">www.meteoschweiz.ch</a> verfügbar. . . . .	39
Abbildung 21	Maximalwerte der lokalen Hagelkorngrossen MESHS über den gesamten Beobachtungszeitraum (2002-2021). . . . .	40
Abbildung 22	MESHS im Jahresverlauf: Tagesmaxima der MESHS-Werte aller betroffenen Orte (Radar-Pixel) je Monat (2002-2021). Schwarze Linien zeigen die angegebenen Perzentilwerte für jeden Monat. . . . .	41
Abbildung 23	Karten der Wiederkehrwerte der MESHS-Hagelkorngrosse für Wiederkehrperioden 2, 5, 10, 20, 50 und 100 Jahre. Pro Ort wird die jeweilige Korngrösse über eine Zeitspanne von 2, 5, 10, 20, 50 bzw. 100 Jahren statistisch mindestens einmal erreicht oder überschritten. Wiederkehrwerte sind mit Unsicherheiten behaftet (vgl. Kapitel 5.2.1). . . . .	45
Abbildung 24	Karten der Wiederkehrwerte der Hagelkorngrosse LEHA mit Referenzfläche 100 m <sup>2</sup> für Wiederkehrperioden 2, 5, 10, 20, 50, 100 Jahre. Pro Ort wird die jeweilige Korngrösse über eine Zeitspanne von 2, 5, 10, 20, 50 bzw. 100 Jahren statistisch mindestens einmal erreicht oder überschritten. Wiederkehrwerte sind mit Unsicherheiten behaftet (vgl. Kapitel 5.2.1). Eine alternative Darstellung mit zentrierten Klassengrenzen findet sich im Anhang, Abbildung 36. . . . .	48

- Abbildung 25 Karte der Anzahl der Tage mit gültigen Hagelmessungen (MESHS-Wert  $\geq 2$  cm) pro km<sup>2</sup> seit 2002. Selbst in den hagelreichen Regionen der Schweiz gibt es an einem einzelnen Ort meist nur wenige Messwerte. Eine statistische Auswertung pro Radarpixel der Beobachtungsdaten liefert daher keine robusten Ergebnisse. . . . . 50
- Abbildung 26 Schematische Darstellung der Daten und Modellschritte 1-4 im Resampling-Verfahren HailStoRe. Die beschriebenen Schritte 1-4 sind mit orangenen Kreisen verortet. . . . . 52
- Abbildung 27 Vier Beispiele von Hagel-Footprints: Umrisse (graue Linien) und Zugbahnen (schwarze Linien), beide aus dem MeteoSchweiz Gewitterzellentracking (TRT) und innerhalb der detektierten Gewitterzelle liegende maximale MESHS-Werte (rot). . . . . 53
- Abbildung 28 Verteilung der MESHS-Hagelkorngössen in Hagelgewittern mit langen (ab 40 km) und kurzen Zugbahnen (bis 40 km). 40 km entspricht der Median-Zugbahnlänge, d.h. 50% der Zugbahnen sind kürzer und 50% sind länger als dieser Wert. Beide Klassen enthalten also gleich viele Hagelzüge. . . . . 54
- Abbildung 29 Beispiele für transformierte Footprints. a) Original-MESHS-Footprint aus den Beobachtungsdaten b)-e) vier perturbierte Footprints. Die Maximalwerte der Footprints werden durch eine für diese Footprint-Grössenklasse angepasste Häufigkeitsverteilung beschrieben. f) Häufigkeitsverteilungen des originalen und der resamplierten Footprints. . . . . 55
- Abbildung 30 Häufigkeit der Wetterklassen der MeteoSchweiz Wetterlagenklassifizierung («GWT10 500hPa») und Anzahl der Tage, an denen Hagelzüge mit MESHS auftraten (MeteoSchweiz Radardomäne, 2002-2021, jeweils 1. April bis 30. September). Linien zeigen den einfachen linearen Zusammenhang der Anzahl Wetterklassentage und der Tage mit Hagelzellen je Wetterklasse. Legende: b bezeichnet den Regressionskoeffizienten und R<sup>2</sup> das Bestimmtheitsmass, das den Anteil der erklärten Varianz beschreibt. . . . . 57
- Abbildung 31 Karte mit Entstehungspunkten (=Orte der ersten Detektion durch den TRT-Gewitterdetektions-Algorithmus, graue Marker) und Hagelgewitter-Regionen. Schwarze Marker markieren Initialisierungspunkte, deren Zugbahnen die Schweiz kreuzten. Die Hagelgewitter-Regionen sind farblich markiert. . . . . 60
- Abbildung 32 Vergleich des Jahregangs der Hageltage ab 2 cm in den Beobachtungsdaten (19 Jahre 2002–2020, rote Punkte) und 500 zufällig ausgewählter 19-Jahr Perioden aus allen Resampling-Jahren. Rote getrichelte Linien kennzeichnen den Median der Anzahl Tage aus den 19 Beobachtungsjahren, graue Boxen kennzeichnen die Bandbreite der Mediane der zufällig ausgewählten Resampling-Klimatologien. . . . . 62
- Abbildung 33 Vergleich der räumlichen Dichte der Entstehungspunkte in den Beobachtungsdaten (links, rot) und einer zufälligen 19-Jahr Periode aus allen Resampling-Jahren (rechts, grau). Die Abbildung ist beispielhaft für eine Durchführung, der Vergleich wird jeweils für 19-Jahr Perioden vielfach wiederholt. Es werden die Entstehungspunkte von MESHS-Footprints verglichen, die die Schweiz betreffen. . . . . 63

Abbildung 34 Vergleich der Statistik der Anzahl MESHS-Footprints je Entstehungsregion aus Abb. 31. Beobachtungsdaten (19 Jahre 2002–2020, rot, Kreis) und eine zufällige 19-Jahr Periode aus allen Resampling-Jahren (grau, Quadrat). Es werden die MESHS-Footprints verglichen, die die Schweiz betreffen. Die Symbole (Kreis und Quadrat) kennzeichnen den Median, dicke Linien die Interquartilsperiode und dünne Linien die gesamte Daten-Spanne. Die Abbildung ist beispielhaft für eine Durchführung, der Vergleich wird jeweils für 19-Jahr Perioden vielfach wiederholt.	63
Abbildung 35 (b-z) Lokale Jahresmaxima der Beobachtungsdaten (rot) und je 30 zufälliger 19-Jahr Perioden aus den Resamplingdaten für zufällig ausgewählte Standorte in der Schweiz (a). Die Jahresmaxima bilden die Grundlage für die Berechnung der Wiederkehrperioden.	67
Abbildung 36 Analog Abbildung 24, aber mit zentrierten Klassengrenzen. Karten der Wiederkehrwerte der Hagelkorngrosse LEHA mit Referenzfläche 100 m <sup>2</sup> für Wiederkehrperioden 50 und 100 Jahre. Pro Ort wird die jeweilige Korngrösse über eine Zeitspanne von 50 bzw. 100 Jahren statistisch mindestens einmal erreicht oder überschritten. Wiederkehrwerte sind mit Unsicherheiten behaftet (vgl. Kapitel 5.2.1).	71

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Reprozessierung und Qualitätskontrollen der Radarhageldaten für die klimatologischen Auswertungen . . . . .	12
Tabelle 2	Übersicht der frei zur Verfügung stehenden Hagelklima-Daten und der nach Gebührenverordnung zur Verfügung stehenden Basisdaten der Hagelklimatologie. LEHA leitet sich aus dem MeteoSchweiz Radarhagelprodukt MESHS ab und wird daher nicht als originärer Datensatz geführt. . . . .	27

## Literatur

- Aznar-Siguan, G., and D. N. Bresch (2019), Climada v1: a global weather and climate risk assessment platform, *Geoscientific Model Development*, 12(7), 3085–3097, doi:10.5194/gmd-12-3085-2019.
- Barras, H. (2021), Hail in Switzerland – crowd-sourcing, nowcasting and multi-day hail clusters, PhD Thesis, University of Bern, Bern, Switzerland.
- Barras, H., O. Martius, L. Nisi, K. Schroeer, A. Hering, and U. Germann (2021), Multi-day hail clusters and isolated hail days in Switzerland – large-scale flow conditions and precursors, *Weather and Climate Dynamics*, 2(4), 1167–1185, doi:10.5194/wcd-2-1167-2021.
- Barras, H., A. Hering, A. Martynov, P.-A. Noti, U. Germann, and O. Martius (2019), Experiences with >50,000 Crowdsourced Hail Reports in Switzerland, *BULLETIN OF THE AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY*, 100(8), 1429–1440, doi:10.1175/BAMS-D-18-0090.1.
- Begert, M. (2008), Die Repräsentativität der Stationen im Swiss National Climatological Network (Swiss NBCN), *Technical Report MeteoSwiss*, 217, 40 pp.
- Bloemendaal, N., I. D. Haigh, H. de Moel, S. Muis, R. J. Haarsma, and J. C. J. H. Aerts (2020), Generation of a global synthetic tropical cyclone hazard dataset using STORM, *Scientific Data*, 7(1), doi:10.1038/s41597-020-0381-2.
- Bresch, D., O. Martius, P. Calanca, and H. Wernli (2021), Seamless coupling of kilometer-resolution weather predictions and climate simulations with hail impact assessments for multiple sectors (scClim). SNF Singergia Grant. Project 2021–2024, <http://c2sm.ethz.ch/research/scclim.html>.
- Coles, S. (2001), *An introduction to statistical modelling of extreme values*, Springer Series in Statistics.
- Fukutome, S., and A. Schindler (2018), MeteoSwiss extreme value analyses: User manual and documentation, *Fachbericht MeteoSchweiz*, 255(3rd edition), 78pp.
- Germann, U., M. Boscacci, M. Gabella, and M. Sartori (2015), Peak performance – Radar design for prediction in the Swiss Alps, Meteorological Technology International.
- Germann, U., J. Figueras i Ventura, M. Gabella, A. Hering, I. Sideris, and B. Calpini (2016), Triggering innovation – The latest MeteoSwiss Alpine weather radar network, Meteorological Technology International.
- Germann, U., D. Nerini, I. Sideris, L. Foresti, A. Hering, and B. Calpini (2017), Real-time radar – A new Alpine radar network., Meteorological Technology International.
- Germann, U., M. Boscacci, L. Clementi, M. Gabella, A. Hering, M. Sartori, I. V. Sideris, and B. Calpini (2022), Weather radar in complex orography, *Remote Sensing*, 14(3), doi:10.3390/rs14030503.

- Hering, A., C. Morel, G. Galli, S. Sényesi, P. Ambrosetti, and M. Boscacci (2004), Nowcasting thunderstorms in the Alpine region using a radar-based adaptive thresholding scheme., in *Proceedings of 3rd European Conference Radar in Meteorology and Hydrology (ERAD)*, pp. 1–6, Copernicus, Visby, Sweden.
- Hering, A., U. Germann, M. Boscacci, and S. Sényesi (2008), Operational nowcasting of thunderstorms in the Alps during MAP D-PHASE, in *Proceedings of the 5th European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology (ERAD)*, pp. 1–5, Helsinki, Finland.
- Hersbach, H., et al. (2020), The ERA5 global reanalysis, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999–2049, doi:10.1002/qj.3803.
- Kopp, J., K. Schröer, C. Schwierz, A. Hering, U. Germann, and O. Martius (2022), The summer 2021 Switzerland hailstorms: weather situation, major impacts and unique observational data, *Weather*, 78(7), 184–191, doi:10.1002/wea.4306.
- Kumjian, M. R., et al. (2020), Gargantuan hail in Argentina, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 101(8), E1241 – E1258, doi:10.1175/BAMS-D-19-0012.1.
- Kunz, M., U. Blahak, J. Handwerker, M. Schmidberger, H. J. Punge, S. Mohr, E. Fluck, and K. M. Bedka (2018), The severe hailstorm in southwest Germany on 28 July 2013: characteristics, impacts and meteorological conditions, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 144(710), 231–250, doi:10.1002/qj.3197, \_eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/qj.3197>.
- Makkonen, L. (2006), Plotting Positions in Extreme Value Analysis, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 45(2), 334–340, doi:10.1175/JAM2349.1.
- MeteoSchweiz (2021), Das Schweizer Hagelmessnetz, <https://www.meteoschweiz.admin.ch/dam/jcr:741c540b-8b35-47eb-9978-0798c1d94564/Das-Schweizer-Hagelmessnetz.pdf>, Zugriff 13.01.2022.
- MeteoSchweiz (2022), Prognoseregionen. Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz. <https://www.meteoschweiz.admin.ch/home/wetter/prognosen/prognoseregionen.html> Zugriff 20.11.2021.
- Müller, S., and M. Schmitz (2021), Nationales Hagelprojekt. Schlussbericht: Aufbereitung historische Hagel-Daten, meteotest AG, Bern, Schweiz.
- NCCS (2021), National Centre for Climate Services : Hail Climatology Switzerland, <https://www.nccs.admin.ch/nccs/en/home/the-nccs/priority-themes/hail-climate-switzerland.html>, accessed 13 January 2022.
- Nisi, L., A. Hering, U. Germann, and O. Martius (2018), A 15-year hail streak climatology for the alpine region, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 144(714), 1429–1449, doi:<https://doi.org/10.1002/qj.3286>.
- Nisi, L., O. Martius, A. Hering, M. Kunz, and U. Germann (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(697, B), 1590–1604, doi: {10.1002/qj.2771}.

- Noti, P. (2016), Hailstorms over Switzerland: Verification of radar-based hail detection algorithms with crowd-sourced app data and hail sensor data, Master Thesis, University of Bern, Bern, Switzerland.
- Raupach, T. H., O. Martius, J. T. Allen, M. Kunz, S. Lasher-Trapp, S. Mohr, K. L. Rasmussen, R. J. Trapp, and Q. Zhang (2021), The effects of climate change on hailstorms, *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(3), 213–226, doi:10.1038/s43017-020-00133-9.
- Raynaud, D., B. Hingray, G. Evin, A.-C. Favre, and J. Chardon (2020), Assessment of meteorological extremes using a synoptic weather generator and a downscaling model based on analogues, *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(9), 4339–4352, doi:10.5194/hess-24-4339-2020.
- Salvatier, J., T. V. Wiecki, and C. Fonnesbeck (2016), Probabilistic programming in python using pymc3, *PeerJ Computer Science*, 2, e55.
- Schweizer Sturmarchiv (2021), 19270802 01 SSWDHC5 Zentrale Voralpen (Swiss Severe Weather Database), [http://www.sturmarchiv.ch/index.php?title=19270802\\_01\\_SSWDHC5\\_Zentrale\\_Voralpen](http://www.sturmarchiv.ch/index.php?title=19270802_01_SSWDHC5_Zentrale_Voralpen), Zugriff 13.1.2022.
- Schwyn, U. (2021), Hail in the Napf region, Master Thesis, University of Bern, Bern, Switzerland.
- Trefalt, S., et al. (2018), A severe hail storm in complex topography in Switzerland-Observations and processes, *Atmospheric Research*, 209, 76–94, doi:10.1016/j.atmosres.2018.03.007.
- Trefalt, S., U. Germann, A. Hering, L. Clementi, M. Boscacci, K. Schröder, and C. Schwierz (2022), Hail Climate Switzerland: Operational radar hail detection algorithm at MeteoSwiss: quality assessment and improvement., *Technical Report MeteoSwiss*, 284, 120pp.
- Treloar, A. B. A. (1998), Vertically integrated radar reflectivity as an indicator of hail size in the greater Sydney region of Australia, in *Proceedings of the 19th Conference on Severe Local Storms*, pp. 48–51, Minneapolis, MN, USA.
- Waldvogel, A., B. Federer, and P. Grimm (1979), Criteria for the detection of hail cells, *Journal of Applied Meteorology*, pp. 1521–1525.
- Weusthoff, T. (2011), Weather Type Classification at MeteoSwiss. Introduction of new automatic classification schemes, *Fachbericht MeteoSchweiz*, 235, 46pp.
- Winterrath, T., C. Brendel, M. Hafer, T. Junghänel, A. Klameth, E. Walawender, E. Weigel, and A. Becker (2017), Erstellung einer radargestützten Niederschlagsklimatologie. Berichte des Deutschen Wetterdienstes No. 251, *Tech. Rep. 251*, Deutscher Wetterdienst DWD, Offenbach, Deutschland.

**MeteoSchweiz**  
Operation Center 1  
CH-8044 Zürich-Flughafen  
T +41 58 460 99 99  
[www.meteoschweiz.ch](http://www.meteoschweiz.ch)

**MeteoSvizzera**  
Via ai Monti 146  
CH-6605 Locarno Monti  
T +41 58 460 97 77  
[www.meteosvizzera.ch](http://www.meteosvizzera.ch)

**MétéoSuisse**  
7bis, av. de la Paix  
CH-1211 Genève 2  
T +41 58 460 98 88  
[www.meteosuisse.ch](http://www.meteosuisse.ch)

**MétéoSuisse**  
Chemin de l'Aérogologie  
CH-1530 Payame  
T +41 58 460 94 44  
[www.meteosuisse.ch](http://www.meteosuisse.ch)

