

ENDBERICHT

betreffend

Erstellung von innovativen Hagelkarten für Österreich

Auftraggeber

Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus
Abteilung I/6 - Hochwasserrisikomanagement
Stubenring 1 1, 1010 Wien

Durchführung und Kooperationen

GeoSphere Austria
Department Klima-Dienstleistung
Department Analyse und Modellentwicklung -Kompetenzeinheit Remsens und Radar

in Kooperation mit
Data Lab Hell GmbH

Wien, am 11.01.2024
Geschäftszahl: 21-002246
Ihre Zahl: 2021-0.764.626

Autorinnen und Autoren

GeoSphere Austria:

Dipl.-Ing. Dr. Vera Meyer
Mag. Hildegard Kaufmann
Mag. Georg Pistotnik
Mag. Lukas Tüchler

Data Lab Hell GmbH:

Dipl.-Ing. Gregor Ehrensperger, BSc, BSc
Dipl.-Ing. Marc-André Falkensteiner, BSc
Dipl.-Ing. Tobias Hell, BSc, PhD

Inhalt

1	Einleitung	4
1.1	Auftrag	5
1.2	Schaffung Grundlagen	5
1.3	Vereinbarte Ergebnisse.....	6
1.4	Dissemination	6
2	Beobachtung von Hagel: Reanalyse aus Radarmessung und Beobachtung	7
2.1	Datengrundlage	7
2.2	Auswertungen	10
3	Langfristige Hagelgefährdung: von der Beobachtung zur Abschätzung der Wiederkehrperioden	17
4	Datenqualität und Vertrauensmaß	22
5	Diskussion der Ergebnisse	27
6	Danksagung	30
7	Literatur und Quellen	30
8	Abbildungsverzeichnis	31

1 Einleitung

Hagel wird definiert als gefrorener Niederschlag in Form von Eiskörnern, die rundlich oder unregelmäßig geformt, klar oder milchig sein können (WMO International Cloud Atlas, 2017, <https://cloudatlas.wmo.int/en/hail.html>). Er ist eine mögliche Begleiterscheinung von Gewittern und entsteht durch die starken Auf- und Abwinde in Gewitterwolken, die zum (wiederholten) Schmelzen und Gefrieren von Niederschlagspartikeln führen. In vielen, aber nicht allen Fällen schmelzen diese Eiskörner noch in der Luft wieder ab. Kommen sie immer noch in gefrorener Form an der Erdoberfläche an, werden sie ab einem Durchmesser von zumindest fünf Millimetern als Hagel bezeichnet. Kleinere Eiskörner werden Graupel genannt.

Gewitter sind meist verhältnismäßig kleinräumige und kurzlebige Phänomene, aber unter günstigen atmosphärischen Voraussetzungen können sie auch mehrere Stunden überdauern und hunderte Kilometer zurücklegen, oder können viele gleichzeitig auftretende Gewitter entsprechend große Flächen betreffen. Das gleiche gilt für Hagel, wobei ein Gewitter – wenn überhaupt – nur in einem relativ kleinen Bereich auch von Hagel begleitet wird.

Gewitter und ihre Begleiterscheinungen können verheerende Folgen für Mensch, Umwelt und Wirtschaft haben und gehören alljährlich zu den teuersten Unwetterphänomenen in Österreich. Im Vergleich zu Starkregen und Sturmböen ist Hagel zwar seltener für direkte Personenschäden verantwortlich – einige Dutzend Verletzungsfolgen durch außerordentlich große Hagelkörner (Prellungen, Hämatome etc.) wurden zuletzt etwa 2021 und 2009 bekannt, Todesfälle gab es schon seit Jahrzehnten nicht mehr –, allerdings fallen die mitunter besonders hohen und dicht konzentrierten wirtschaftlichen Schäden auf, die bei den schlimmsten Ereignissen die Marke von hundert Millionen Euro deutlich überschreiten können. Das liegt daran, dass ab einer bestimmten Korngröße sämtliche landwirtschaftliche Kulturen, Fahrzeuge und sogar Gebäude verwundbar sind, bei gleichzeitig nur limitierten Möglichkeiten für Schutz- oder Vorsorgemaßnahmen.

Bessere Kenntnisse über die Verteilung, Häufigkeit und die extremen Merkmale von Hagelereignissen verbessern das Verständnis des Phänomens, die Vorhersage seines Auftretens und in der Folge auch die Entwicklung wirksamer Maßnahmen zur Schadensminderung. Die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) als teilrechtsfähige Einrichtung des Bundes, nunmehr GeoSphere Austria – Bundesanstalt für Geologie, Geophysik, Klimatologie und Meteorologie, hat zuletzt im Jahr 2012 im Auftrag der HORA-Partner eine Hagelgefährdungskarte für Österreich erstellt. Diese Karte wurde nun basierend auf neuen und innovativen Verfahren erneuert und deutlich erweitert. Die Arbeiten orientieren sich methodisch an den kürzlich in der Schweiz veröffentlichten Hagelprodukten (www.meteoschweiz.admin.ch/klima/klima-der-schweiz/hagelklimatologie.html). Die im Zuge des

Auftrags entwickelten Hagelgefährdungskarten bieten einen neuartigen und umfassenden Einblick in die beobachteten Hagelereignisse in Österreich, aber auch eine Abschätzung der Wiederkehrperioden.

1.1 Auftrag

Die ZAMG als teilrechtsfähige Einrichtung des Bundes, nunmehr GeoSphere Austria, erhielt vom Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus (BMLRT) im Rahmen eines Werkvertrags den Auftrag zur Erstellung von innovativen Hagelkarten für Österreich.

Vereinbart wurden folgende Leistungen:

- Aufbereitung der Beobachtungsdaten und Erstellung eines homogenen Radararchivs
- Datenaufbereitung der Hagelgewitterzüge und anderer Parameter für die Langzeitstudie
- Gewittersimulation für Langzeitreihen zur Abschätzung der Wahrscheinlichkeiten
- Datenaufbereitung und Bereitstellung der Endprodukte

Die geplanten Ergebnisse sind Auswertungen auf zumindest einem 5 km x 5 km Raster, wobei aber eine 1 km x 1 km Auflösung angestrebt wird. Folgende Produkte wurden für das österreichische Staatsgebiet erstellt und in für die Darstellung auf der eHORA-Plattform (<https://www.hora.gv.at/>) geeigneten Formaten bereitgestellt:

- Anzahl der gemessenen Hageltage in zumindest drei Wahrscheinlichkeitskategorien
- Anzahl der Tage mit definierten Hagelkorngrößen (für unterschiedliche Kategorien)
- Jährlichkeiten des Auftretens von Hagel mit Vertrauensmaß
- Jährlichkeiten des Auftretens bestimmter Hagelkorngrößen mit Vertrauensmaß

1.2 Schaffung Grundlagen

Als Basis für die vereinbarten Leistungen wurden insbesondere im Jahr 2022 von der damaligen ZAMG im Rahmen von internen Entwicklungen (Eigenanteil) Hagelwahrscheinlichkeiten aus Radardaten erstellt. Die Arbeitsschritte und Ergebnisse umfassen:

- Datenaufbereitung und Qualitätskontrolle von Beobachtungsdaten, Radardaten und Modelldaten
- Hagelableitungen und Hagelarchiv durch Sichtung und Evaluierung der Hagelparameterableitungen, Entwicklung einer Qualitätskontrolle der Hagelableitung, Homogenisierung des Hagelarchivs

- Klimatologische Auswertungen (aus Reanalyse der Beobachtung) durch Berechnung von Hagelgefährdungskarten, Machbarkeitsstudie zur Berechnung der Wiederkehrperioden
- Verifikation und Validierung anhand von Beobachtungsdaten und meteorologischer Plausibilität

1.3 Vereinbarte Ergebnisse

Nach Abstimmung mit den Auftraggebern umfassen die Endauswertung folgenden Inhalt:

REANALYSE AUS 14 Jahren RADARMESSUNG und BEOBACHTUNGEN

Österreichkarten mit Anzahl der im Beobachtungszeitraum gemessenen Hageltage in fünf Hagelkorngrößenklassen in 1 km x 1 km Auflösung.

Verfügbar im Endbericht.

Österreichkarte mit der im Beobachtungszeitraum maximalen gemessenen Hagelkorngröße in fünf Korngrößenklassen in 1 km x 1 km Auflösung.

Verfügbar im Endbericht.

LANGFRISTIGE HAGELGEFÄHRDUNG - VON DER BEOBACHTUNG ZUR ABSCHÄTZUNG VON WIEDERKEHRPERIODEN

Österreichkarten mit Wiederkehrperioden (10, 20, 25 und 30 Jahre) von Hagelkorngrößen in fünf Größenklassen (interpretierbar als „Hagelgefährdung“) mit Vertrauensmaß in 1 km x 1 km Auflösung.

Verfügbar im Endbericht und aufbereitet zur Darstellung in eHORA.

QUALITÄTSKARTE

Österreichkarte mit einer für die Beobachtung von Hagel entwickelten Qualitätsmaß, interpretierbar als Vertrauensmaß aller zur Verfügung gestellten Karten.

Verfügbar im Endbericht und aufbereitet zur Darstellung in eHORA.

1.4 Dissemination

Zusätzlich wurden die Arbeiten auf der EGU (European Geosciences Union) General Assembly 2023 in Wien (<https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU23/EGU23-14903.html>) und am 9. Österreichischen MeteorologInnenntag 2023 in Innsbruck

(www.uibk.ac.at/congress/meteorologinnentag2023/abstracts/meteorologinnentag2023_o9_ehrenspenger.pdf) vorgestellt und diskutiert. Es wurde ein fachlicher Austausch innerhalb der DACH Kooperation der Wetterdienste (Deutscher Wetterdienst, GeoSphere Austria, MeteoSchweiz) angeregt, der sich 2025 fortsetzen soll. Ein vertiefender Austausch findet zudem mit Jun.-Prof. Dr. Katharina Schröder von der Universität Freiburg und Kollegen des Czech Hydrometeorological Institute und dem Institute of Atmospheric Physics CAS statt. Des Weiteren ist geplant, die Ergebnisse aus dem Projekt auf dem 4th European Hail Workshop 2024 in Karlsruhe, Deutschland vorzustellen. Ein Beitrag wird dem Versicherungsverband Österreich für das bevorstehende DACH-Treffen der Versicherungen in Bern (18.-19. Jänner 2024) und das eHORA Systempartnertreffen in Wien (29. Jänner 2024) zur Verfügung gestellt werden.

2 Beobachtung von Hagel: Reanalyse aus Radarmessung und Beobachtung

Während Blitze, und damit das Auftreten von Gewittern, direkt und mit hoher Genauigkeit flächendeckend über Österreich gemessen werden können, liegen keine lückenlosen direkten Beobachtungen von Hagel vor. Dreidimensionale Radardaten bieten die Möglichkeit Hagelindikatoren abzuleiten, die flächendeckend und mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung verfügbar sind: Aus dem vertikalen Radarreflektivitäts- und Temperaturprofil lassen sich die erwarteten Hagelkorngrößen in Gewitterwolken empirisch abschätzen und an einem nicht vollständigen, aber unabhängigen Vergleichsdatensatz aus direkt beobachteten Korngrößen kalibrieren. Das daraus erstellte Hagelkorngrößenarchiv aus Radardaten erlaubt bei einem ausreichend langjährigen Datensatz anschließend eine Abschätzung und Untersuchung der Auftrittshäufigkeiten von Hagelkorngrößen oberhalb bestimmter Schwellenwerte sowie der maximalen Hagelkorngrößen in Österreich.

2.1 Datengrundlage

Für die Berechnung von Hagelindikatoren analysiert das Austrian Thunderstorm Nowcasting Tool (A-TNT) der GeoSphere Austria (Meyer et al., 2014) die dreidimensionale Niederschlagsstruktur und die elektrische Aktivität in Gewitterwolken aus Wetterradardaten und Blitzdaten auf bekannte Hagelsignaturen. Die Radardaten stammen von dem Radarmessnetz der Austro Control GmbH (Kaltenboeck, 2012). Die Daten stehen in fünfminütiger Auflösung auf einem $1 \times 1 \times 1 \text{ km}^3$ Gitter für 1-16 km Höhe in 14 Reflektivitätsklassen zur Verfügung. Demzufolge ist auch die Auflösung der kalibrierten Hagelkorngrößen 5 Minuten und $1 \times 1 \text{ km}^2$. Das dreidimensionale Radardatenarchiv ist für

die GeoSphere Austria bis Mitte 2009 zurück verfügbar. Die im weiteren verwendete Messperiode umfasst demnach fast 14 Jahre 2009-2022.

Die für die Ableitung von Hagelparametern notwendige Nullgradgrenze wird aus dem INCA-System („Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis“; Haiden et. al, 2011) der GeoSphere Austria bezogen. Ab 01.04.2011 ist die Nullgradgrenze direkt im INCA-Archiv verfügbar, davor wurde sie aus der Schneefallgrenze abgeleitet.

Die verwendete Maßzahl zur Abschätzung der Hagelgefahr aus Radarsignaturen ist die „Maximum Estimated Hail Size“ (MEHS; Witt et al., 1998), die allerdings idealerweise noch an tatsächliche Hagelbeobachtungen kalibriert werden sollte, um sie um mögliche technische Differenzen zwischen verschiedenen Radarsystemen zu bereinigen. Bisher wurde MEHS hierzulande nur zur Ableitung einer korngößenunabhängigen Hagelwahrscheinlichkeit anhand von Schadensmeldungen der Österreichischen Hagelversicherung (ÖHV) verwendet. Da landwirtschaftliche Schäden allerdings sehr sensitiv auf die saisonale Vulnerabilität der angebauten Früchte sind, lassen diese Schadensmeldungen keine eindeutigen Rückschlüsse auf Hagelkorngößen und damit auch keine Kalibrierung von MEHS zu. Für die aktuelle Studie wurde MEHS an tatsächlich beobachtete Hagelkorngößen kalibriert, die von der European Severe Weather Database (<https://eswd.eu/>), der Meldeplattform WETTERMELDEN.AT (<http://www.wettermelden.at>) und einer internen Sammlung aus aufbereiteten Medienberichten, Meldungen aus sozialen Medien und der Dokumentation von Feuerwehren zusammengetragen wurden.

Zur Qualitätskontrolle, um Artefakte der Radarmessung oder mögliche Fehler in der Hagelmeldung auszuschließen, wurden nur jene MEHS-Werte und jene Beobachtungsdaten verwendet, die einer Gewitterzelle aus A-TNT zugeordnet werden konnten.

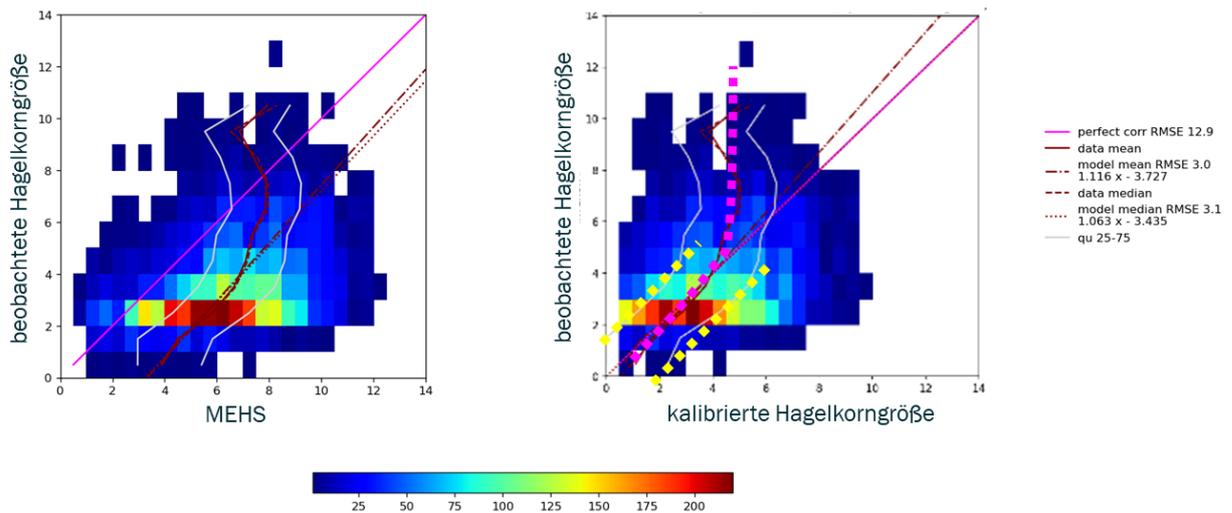


Abbildung 1: Korrelation zwischen beobachteten Hagelkorngößen und dem Radarparameter MEHS (links) sowie den kalibrierten Hagelkorngößen (rechts) aus Radardaten dargestellt als Häufigkeitshistogramm (siehe Text).

Abbildung 1 zeigt die Korrelation zwischen den beobachteten Hagelkorngößen und dem Radarparameter MEHS beziehungsweise den kalibrierten Hagelkorngößen aus Radardaten. Median und Mittelwert, sowie die zugehörigen Kalibrierungsgeraden sind dargestellt in dunkelrot, das 25. und 75. Perzentil der Verteilung als graue Linien. Die perfekte Korrelation ist als pinke Gerade dargestellt. Im rechten Graphen sind zur Veranschaulichung Median und Mittelwert als pink-strichlierte Linie und die Perzentile als gelb-strichlierte Linie hervorgehoben. Sowohl Median als auch Mittelwert liegen nach der Kalibrierung bis in etwa einer Hagelkorngöße von 5 cm auf der Geraden der perfekten Korrelation. Ab Hagelkörnern größer als 5 cm ist die Korrelation zwischen beobachteten und aus Radardaten abgeschätzten Hagelkorngößen nur noch schwach. Außerdem werden die extremsten Hagelkorngößen in der Radarmessung systematisch unterschätzt. Grund dafür ist eine lediglich grobe Abstufung der zugrundeliegenden Radardaten, die in nur 14 Reflektivitätsklassen vorliegen und daher keine Reflektivitäten größer 58 dBZ auflösen können, welche recht verlässlich auf extrem großen Hagel hindeuten würden. Ebenfalls sichtbar sind die Unsicherheiten in der Beziehung zwischen Hagelbeobachtung und Radarmessung, veranschaulicht als 25. und 75. Quantil.



Abbildung 2: Korngrößenverteilungen aus zwei unterschiedlichen Hagelereignissen.

Abbildung 2 zeigt die unterschiedlichen Erscheinungsformen von Hagel, die in der Radarmessung im Detail nicht aufgelöst werden können. Wegen der bestehenden Unsicherheiten aus der Radarmessung (Allen et al., 2022) sowie bei Meldungen von Beobachtern (Barras et al., 2019), aber auch weil in einem Hagelereignis nicht nur eine Korngröße vorkommt, sondern es sich in den meisten Fällen um nicht immer gleichartige Verteilungen von Korngrößen handelt (Germann et al., 2022; siehe auch Abbildung 2), handelt es sich im Weiteren bei den kalibrierten Hagelkorngrößen aus Radardaten vielmehr um die *wahrscheinlichsten* Hagelkorngrößen.

2.2 Auswertungen

Aus dem neu erstellten Archiv der kalibrierten Hagelkorngrößen aus Radardaten können Österreichkarten mit den maximalen modellierten Hagelkorngrößen auf einem 1 km x 1 km Gitter generiert werden. Da Hagel, der in der Radarmessung nur in einer gewissen Höhe gemessen werden kann, durch den mitunter sehr starken Wind vertragen werden kann, wurde diese Unsicherheit durch einen Maxpooling-Ansatz auf Tagesauswertungen (Maximumfilter mit 3 km Radius) berücksichtigt. Um Einschränkungen der Radarmessung wie Abschattung des Radarsignals durch die Topographie oder Dämpfung des Radarsignals bei der Durchdringung von Niederschlagsfeldern entgegenzuwirken, wurden die Korngrößen aus Hagelmeldungen wieder eingebunden. Die Meldungen wurden auf den nächstliegenden Gitterpunkt projiziert. Da davon ausgegangen werden muss, dass der beobachtete Hagel mehr als die 1 km² räumliche Auflösung des Gitterpunktes betroffen hat, wurde sie ebenfalls mit einem Maximumfilter (3 km Radius) aufgeweitet.

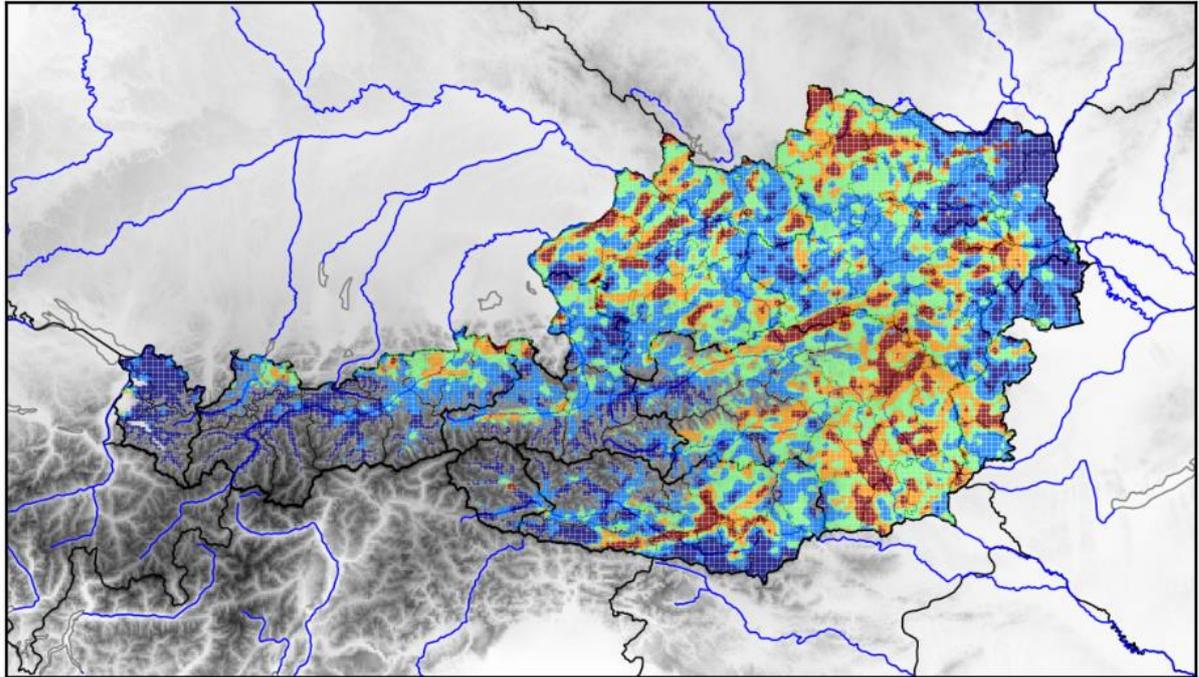


Abbildung 3: Maximale im Untersuchungszeitraum abgeschätzte Hagelkorngröße [cm].

Analog zur Ermittlung der maximalen Hagelkorngrößen wurden Häufigkeitskarten für die ausgewählten Korngrößenkategorien ebenfalls auf dem 1 km x 1 km Gitter untersucht. Im Beobachtungszeitraum 2009-2022 gemeldete Korngrößen wurden so eingebracht, dass die an einem Gitterpunkt maximal beobachtete Korngröße zumindest einmal im Ereigniszeitraum auch aus den Radardaten modelliert werden muss. Scheinen sie nicht in den Radarauswertungen auf, werden sie auf den nächstliegenden Gitterpunkt projiziert und, aus dem gleichen Grund wie bei der Analyse der maximalen Hagelkorngrößen (Abbildung 3), mit einem Maximumfilter (3 km Radius) aufgeweitet.

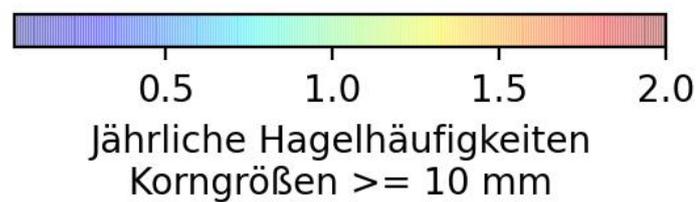
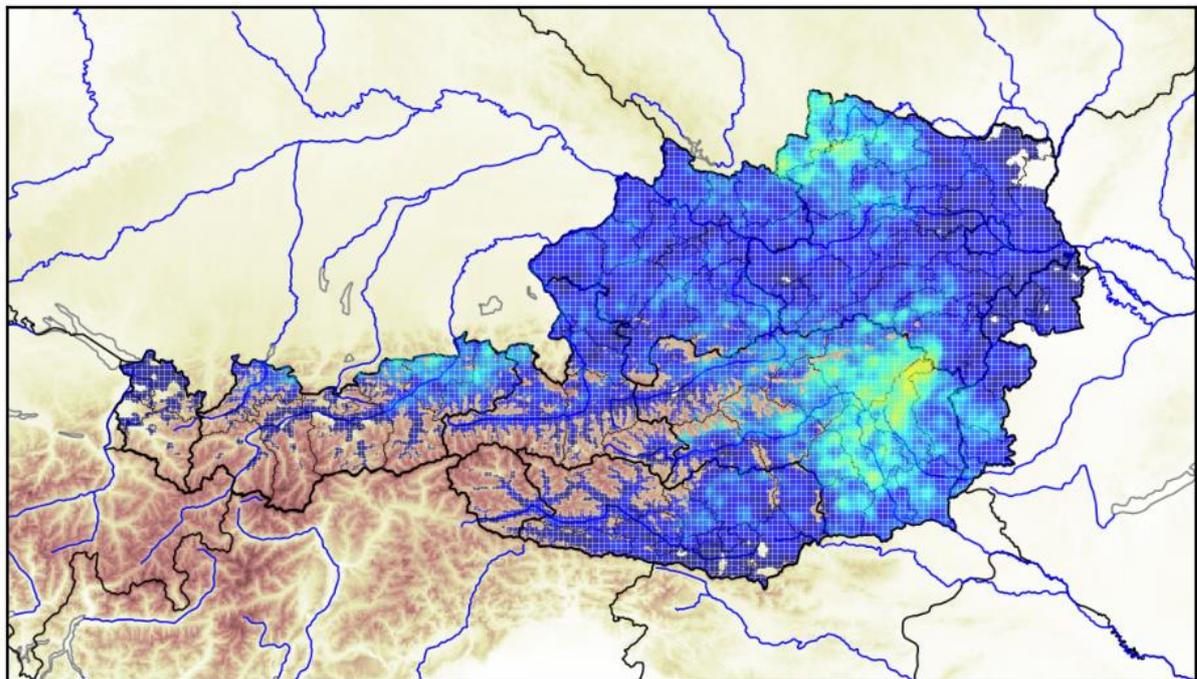


Abbildung 4: Jährliche Häufigkeit von Hagelereignissen mit modellierten Hagelkorngrößen ab 1 cm im Untersuchungszeitraum.

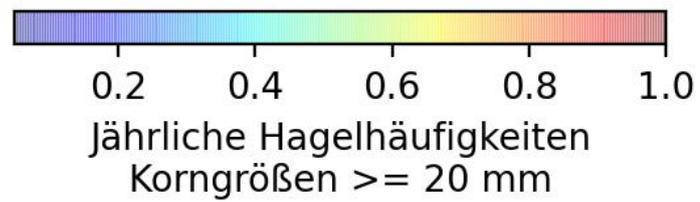
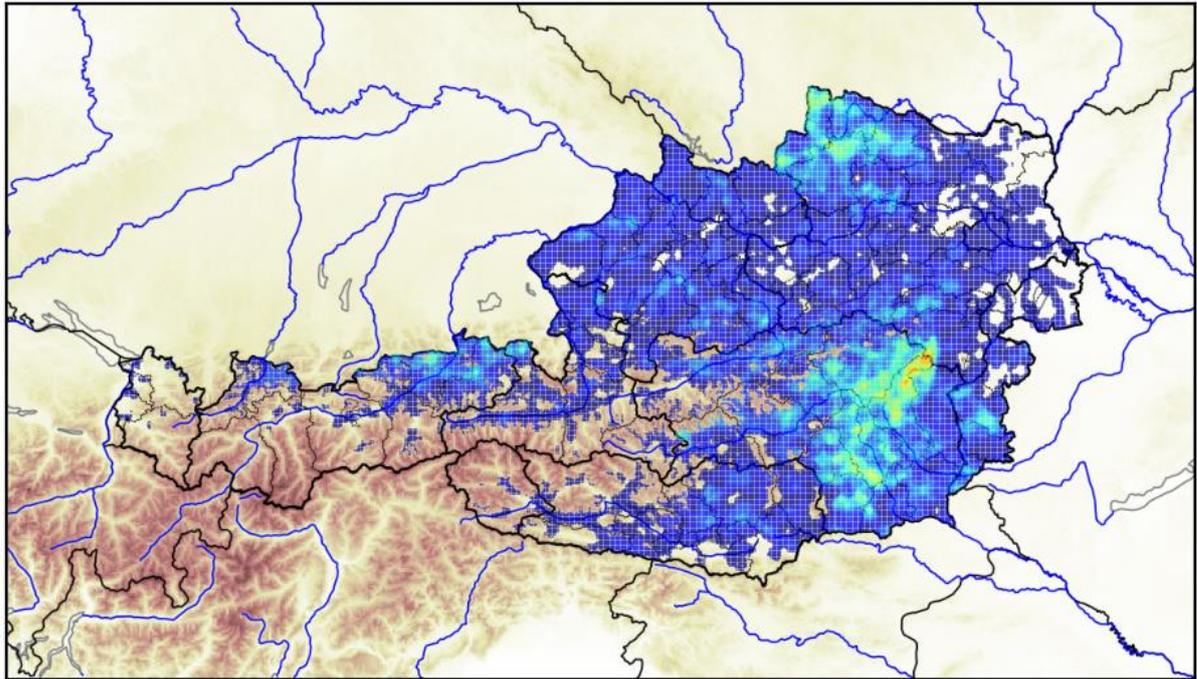


Abbildung 5: Jährliche Häufigkeit von Hagelereignissen mit modellierten Hagelkorngrößen ab 2 cm im Untersuchungszeitraum.

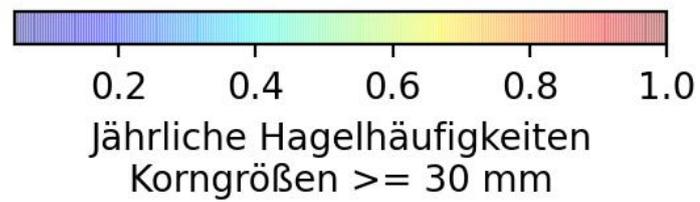
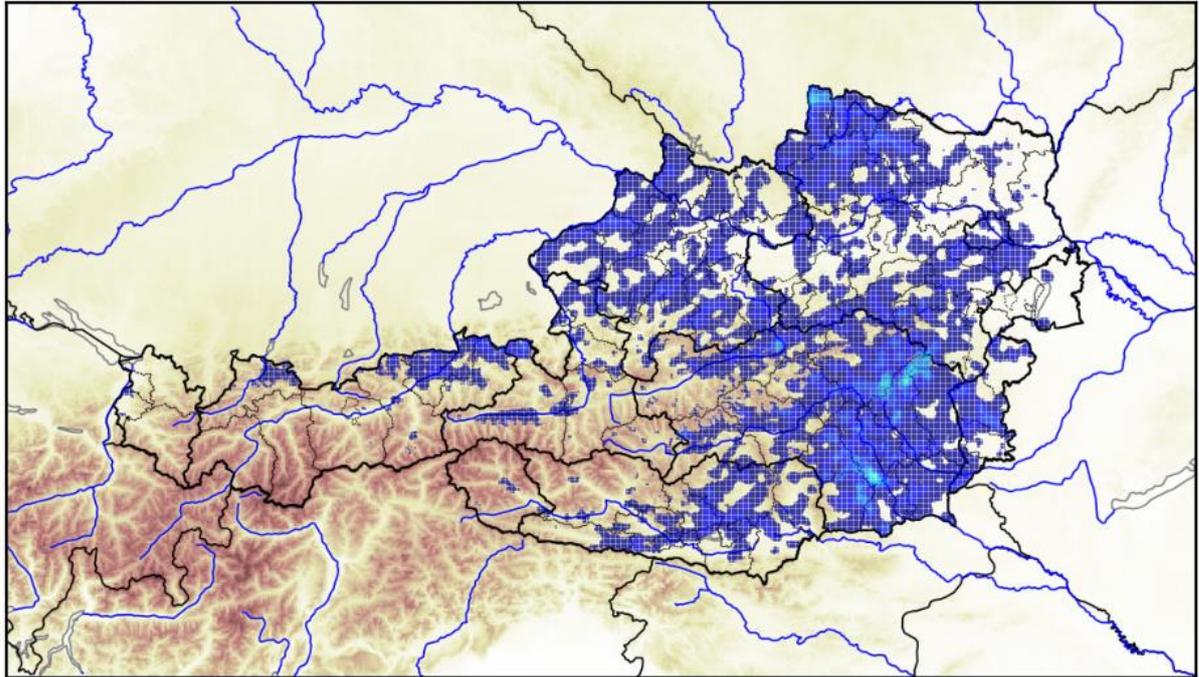


Abbildung 6: Jährliche Häufigkeit von Hagelereignissen mit modellierten Hagelkorngrößen ab 3 cm im Untersuchungszeitraum.

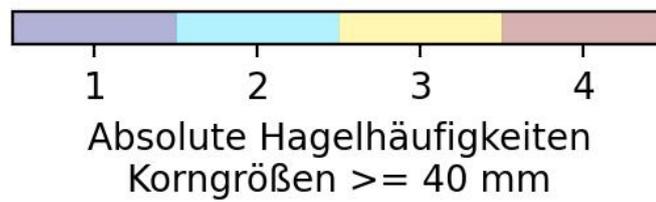
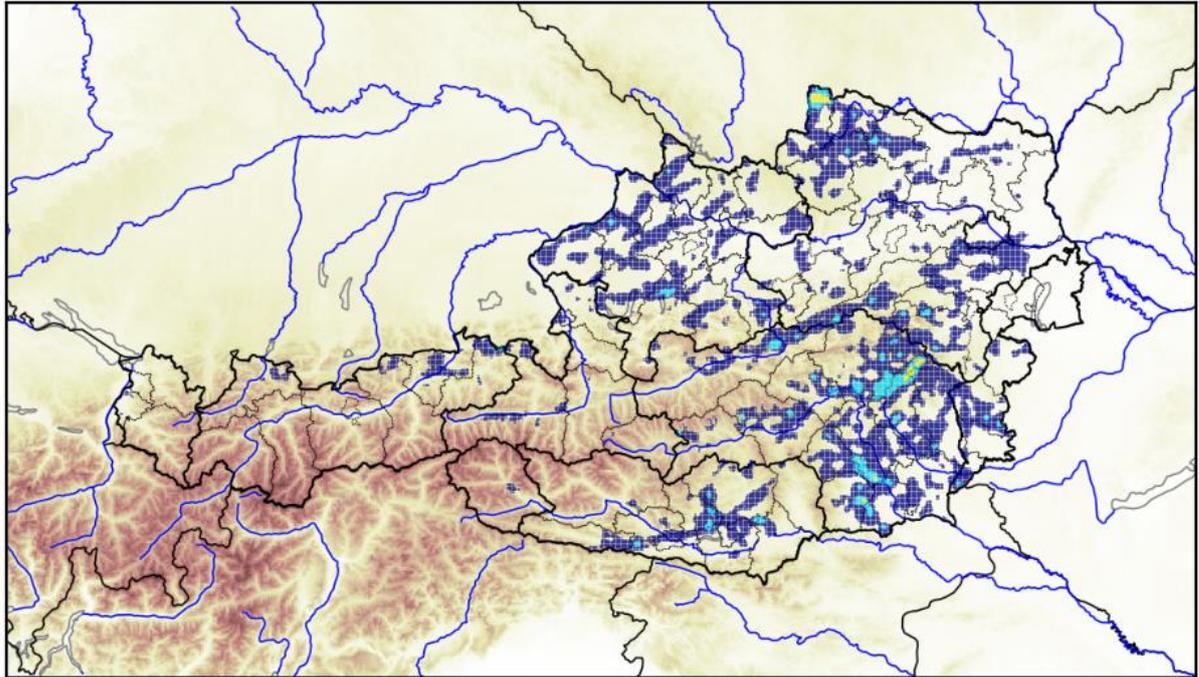


Abbildung 7: Absolute Häufigkeit von Hagelereignissen mit modellierten Hagelkorngrößen ab 4 cm im Untersuchungszeitraum.

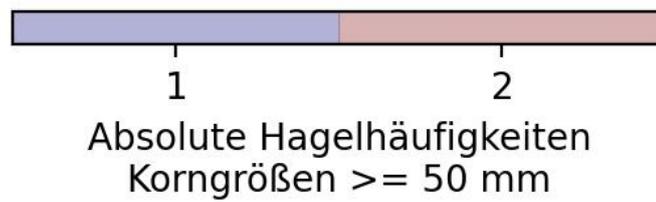
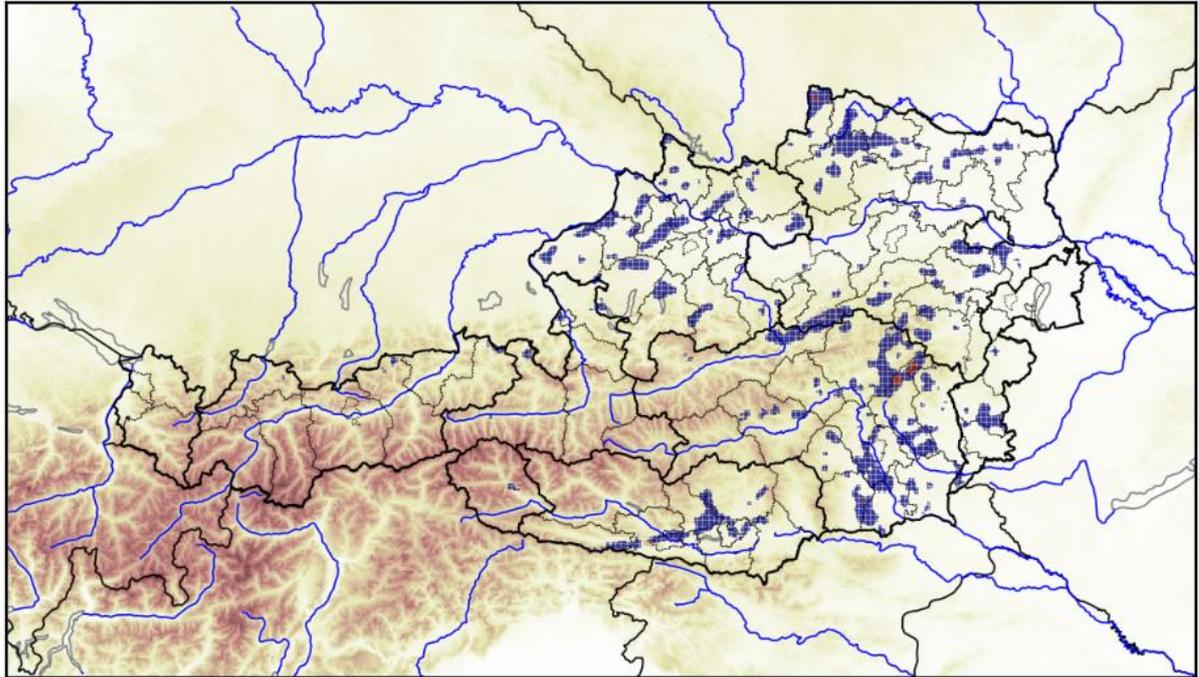


Abbildung 8: Absolute Häufigkeit von Hagelereignissen mit modellierten Hagelkorngrößen ab 5 cm im Untersuchungszeitraum.

3 Langfristige Hagelgefährdung: von der Beobachtung zur Abschätzung der Wiederkehrperioden

Auf Grundlage der kalibrierten Hagelkorngrößen wird anschließend eine Auswahl von Wiederkehrperioden berechnet. Wegen der geringen Anzahl an Beobachtungsjahren lassen sich diese nicht direkt aus den vorhandenen Daten ablesen, sondern erfordern eine entsprechende, statistische Modellierung. Herausfordernd ist dabei die Seltenheit von Hagelereignissen, da die Berechnung auf den vorhandenen Daten basiert.

Die Basis zur Schätzung der Wiederkehrperioden bildet der Ansatz der metastatistischen Extremwertverteilung (Marani et al., 2015) in einem räumlich-zeitlichen Modell (Falkensteiner et al., 2023). Dabei werden die Hagelkorngrößen als Weibull-verteilte Zufallsvariablen modelliert. Anschließend werden die zugehörigen Verteilungsparameter in Abhängigkeit von Ort (Längengrad und Breitengrad) und Zeit (Jahr und Tag des Jahres) sowie Tageswerte weiterer atmosphärischer Eingangsgrößen (siehe Tabelle 1) geschätzt. Diese Schätzung erfolgt durch ein neuronales Netz, welches mit vergleichsweise wenig Rechenaufwand in der Lage ist, komplexe Interaktionen zwischen mehreren Inputparametern zu modellieren.

Tabelle 1: Liste der Covariablen

COVARIABLEN	Parameter	Quelle
Längengrad	-	INCA
Breitengrad	-	INCA
Jahr	-	A-TNT
Tag des Jahres	-	A-TNT
Niederschlag	Tagesmaximum Tagesmedian	INCA
Temperatur (2m über Grund)	Tagesmaximum Tagesmedian	INCA
Taupunkt (2m über Grund)	Tagesmaximum Tagesmedian	INCA
relative Feuchte (2m über Grund)	Tagesmaximum Tagesmedian	INCA
Schneefallgrenze	Tagesmaximum Tagesmedian	INCA
Wind	Tagesmaximum Tagesmedian	INCA
Böen	Tagesmaximum Tagesmedian	INCA
CAPE	Tagesmaximum	ERA-5
Blitzamplitude	Tagesmaximum	ALDIS

Anhand dieser Verteilungsparameter und der Hageltage im Beobachtungszeitraum werden daraufhin für jeden Ort die gewünschten Wiederkehrperioden mittels eines metastatistischen Ansatzes berechnet. Die Methodik verwendet dabei nicht nur die sehr raren Extremereignisse, sondern nützt - im

Gegensatz zu klassischen Ansätzen - alle vorhandenen Hageltage mit kalibrierten Graupel- und Hagelkorngrößen größer 0 mm, was sich positiv auf die Qualität der Schätzung auswirkt.

Das Modell profitiert weiterhin davon, dass für das Fitting der Verteilungsparameter die Daten nicht auf Österreich eingeschränkt wurden, sondern der gesamte Datensatz verwendet wurde (ein Rechteck, das Österreich großzügig umschließt). Dadurch können Interaktionen zwischen Inputparametern besser durch das neuronale Netz abgebildet werden.

Das resultierende Modell erlaubt die Berechnung beliebiger Wiederkehrperioden, verliert aber naturgemäß mit zunehmendem Zeithorizont an Aussagekraft. Karten mit jenen Hagelkorngrößen, die im Mittel einmal in 10, 20, 25 und 30 Jahren zu erwarten sind, werden in den Abbildungen 9-12 dargestellt.

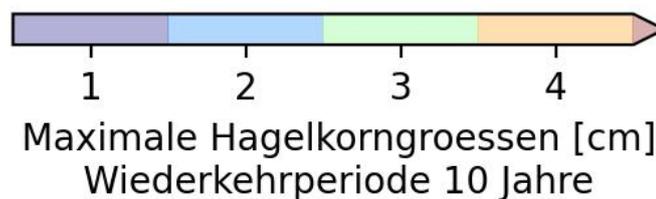
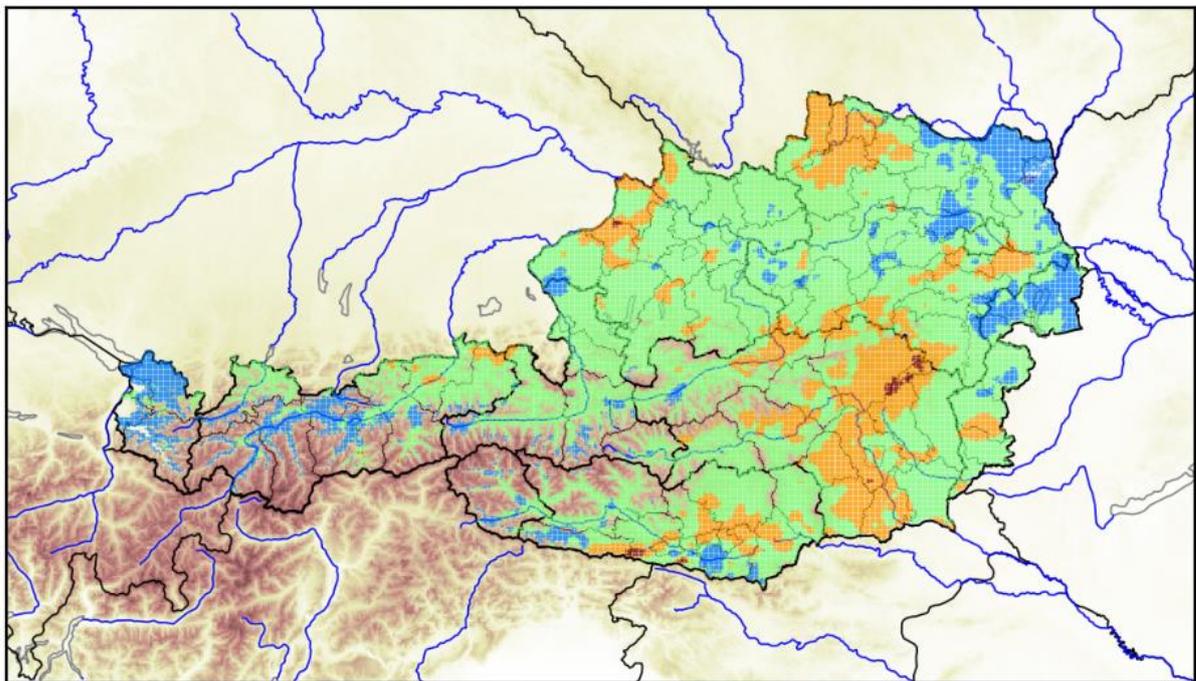


Abbildung 9: Österreichkarte mit Hagelkorngrößen [cm] für eine 10-jährliche Wiederkehrperiode.

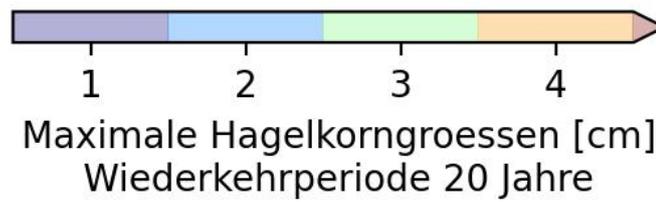
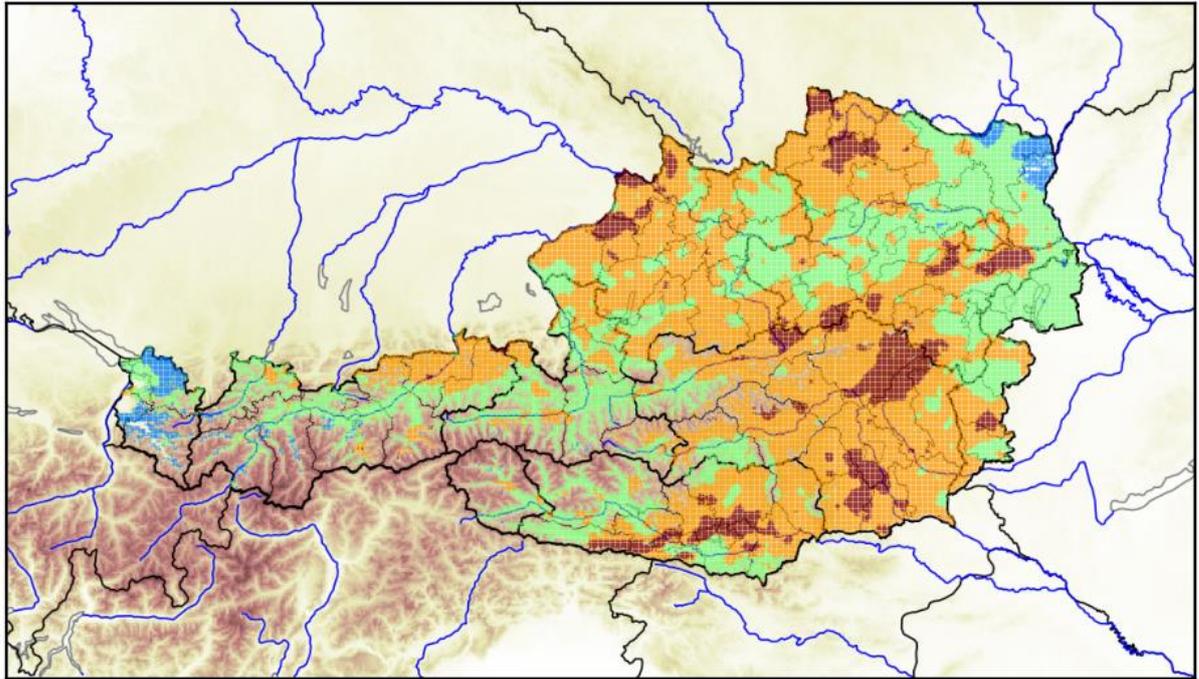


Abbildung 10: Österreichkarte mit Hagelkorngrößen [cm] für eine 20-jährliche Wiederkehrperiode

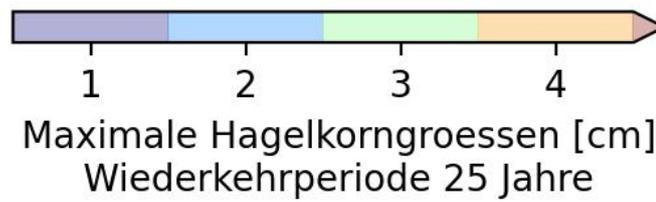
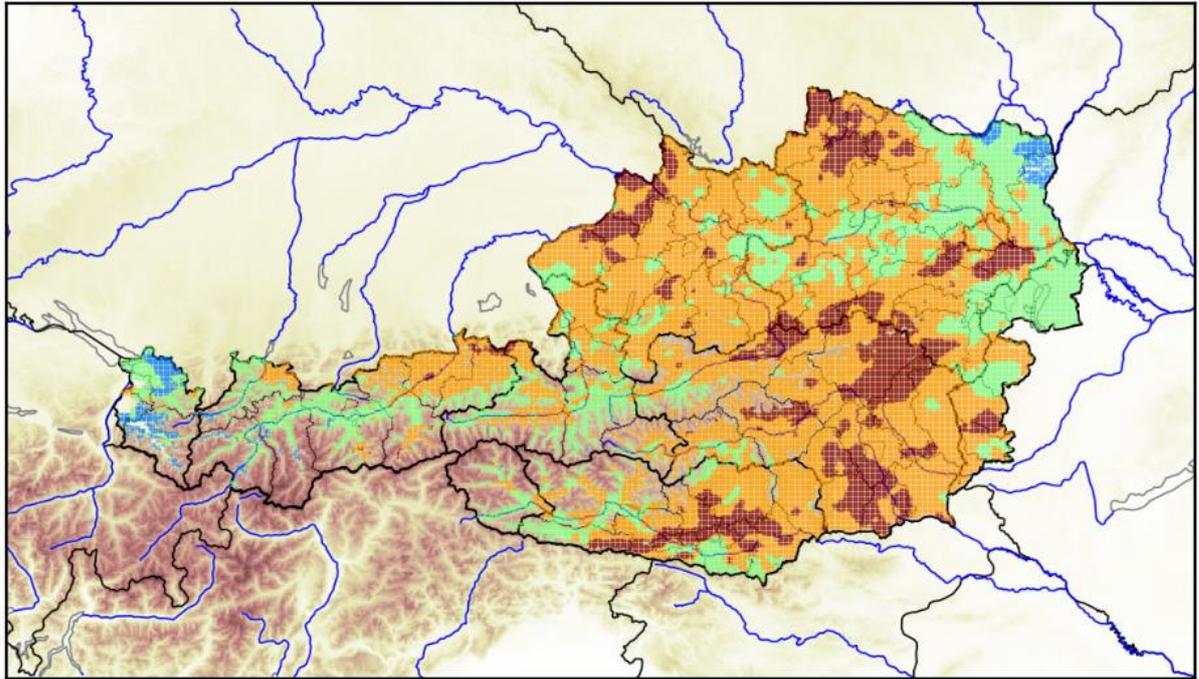


Abbildung 11: Österreichkarte mit Hagelkorngrößen[cm] für eine 25-jährliche Wiederkehrperiode

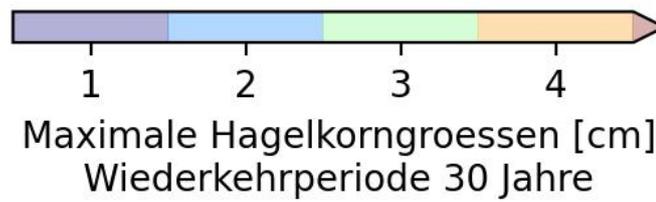
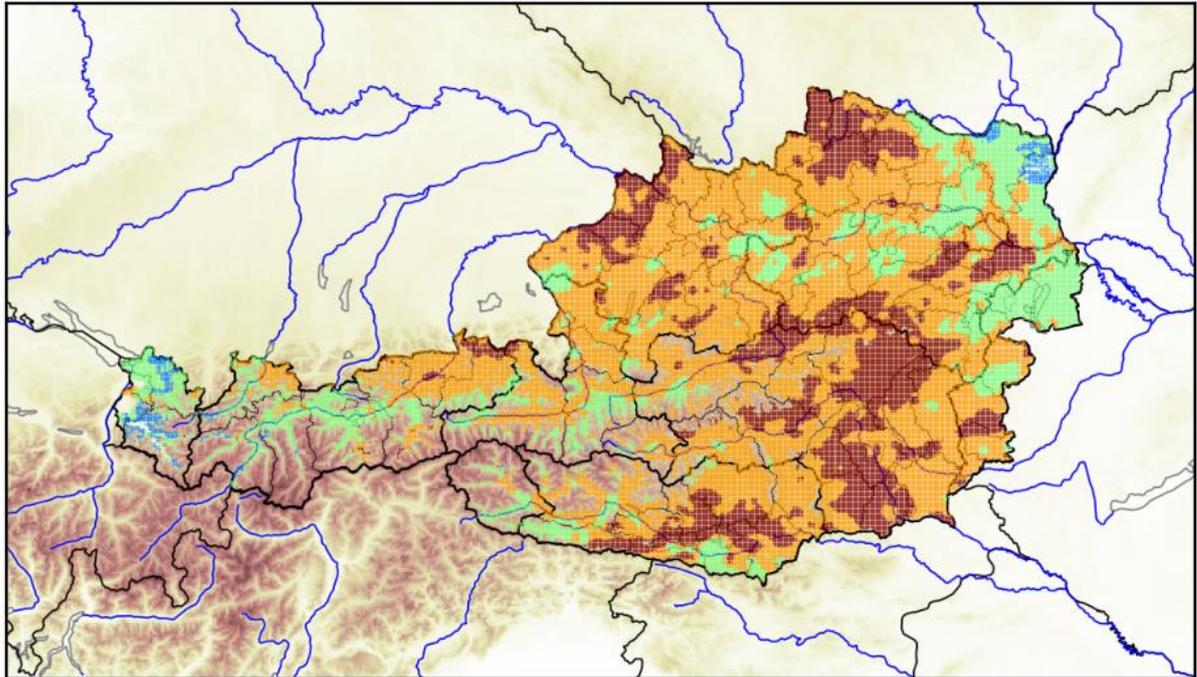


Abbildung 12: Österreichkarte mit Hagelkorngrößen[cm] für eine 30-jährliche Wiederkehrperiode

4 Datenqualität und Vertrauensmaß

Die Radarmessung von Niederschlägen unterliegt unausweichlichen Beeinträchtigungen aufgrund der Erdkrümmung und topographischer Hindernisse, die die Ausbreitung der Radarstrahlen einschränken. Allen Ergebnissen zugrunde gelegt wird deshalb ein eigens für die Messung von Hagel in Gewittern entwickeltes Vertrauensmaß. Das Vertrauensmaß ist ein Wert zwischen 0 (keine verlässlichen Aussagen über Hagel möglich) und 1 (optimale Messbedingungen für Hagel). Im Vertrauensmaß nicht abgebildet sind die schon in der Hagelableitung aus Radardaten beinhalteten Schwankungsbreiten (siehe Abbildung 1).

In Tabelle 2 sind jene Parameter und deren Skalierung gelistet, die direkte Auswirkungen auf die lokale Datenqualität hinsichtlich der Abschätzung von Hagel in Gewitter haben. Ausschlaggebend zur Messung jenes Bereiches in einer Gewitterwolke, in dem es zu Hagelbildung kommen kann, sind:

1. Die minimale Radarstrahlhöhe über Grund.
2. Die maximale Radarstrahlhöhe über Grund. Aufgrund der Radarmesstrategie und der maximalen Höhe der verwendeten Radarprodukte ist aufgrund der Messgeometrie im Radarmessnetz immer 1. Die Qualität der maximalen Radarstrahlhöhe ist allerdings wichtig für die Ermittlung der vertikalen Säule (Punkt 3)
3. Die vertikale Säule stellt jenen vertikalen Bereich dar, der für die Ableitung der Hagelindikatoren wichtig ist. Im Fall des MEHS ist das im Wesentlichen der Bereich zwischen der 0 °C und der -20 °C Grenze.
4. Kleine Messvolumen bieten die höchste Genauigkeit über die vorliegende Hydrometeorverteilung. Je weiter die Messung vom Radar entfernt ist, desto größer wird das Messvolumen und die Rückstreuungseigenschaften unterschiedlicher Bereiche in, neben aber auch über der Wolke wirken sich auf die ermittelte Messgröße aus.

Tabelle 2: Liste der Parameter mit Auswirkungen auf die lokale Datenqualität der Radarmessung.

Parameter		Normierung		Intervall
minimale Radarstrahlhöhe über Grund	h_min	qual(h_min)	[1 - 0]	[1500 - 6000 m]
maximale Radarstrahlhöhe über Grund	h_max	qual(h_max)	[0 - 1]	[2500 - 6000 m]
vertikale Säule	h_ext	qual(h_ext)	[0 - 1]	[1000 - 4500 m]
minimales Messvolumen (entsprechende radiale Distanz zum Radar)	vol_min	qual(vol_min)	[1 - 0]	[0.05 - 2.5 km ³] ([15 - 100 km])

Neben dem Parameter und dessen Abkürzung, sind in der Tabelle die Abkürzung des Qualitätsmaßes und das zugehörige Intervall der Normierung, sowie das Normierungsintervall des Parameters angeführt. Für die minimale Radarstrahlhöhe über Grund, wird das Qualitätsmaß 1, wenn h_{min} kleiner 1500 m ist und 0, wenn $h_{min} > 6000$ m ist. Das Qualitätsmaß für die vertikale Säule bildet ab, wie viel des für die Hagelableitung relevanten Bereichs der inneren vertikalen Struktur des Gewitters vom Radar erfasst wird. Es wird aus $1 - (qual(h_{max}) - qual(h_{min}))$ berechnet.

Das Qualitätsmaß für die Radarmessung ist eine Kombination aus den einzelnen, für die Radarmessung relevanten Qualitätsmaßen:

$$Qualität = qual(h_{min}) * \frac{qual(h_{min}) + qual(h_{ext}) + qual(vol_{min})}{3}$$

Es soll qualitativ, unter Berücksichtigung der geometrischen Einschränkungen der Radarmessung darstellen, wie gut Rückschlüsse auf Hagel getroffen werden können und demnach im Weiteren auch als Vertrauensmaß referenziert werden. $qual(h_{min})$ wird auch als Faktor verwendet, da die minimale Höhe über Grund auch ein ausschlaggebendes Kriterium ist, ob überhaupt Rückschlüsse auf Hagelvorkommen getroffen werden können. Kann der Gewitterkern nicht mehr gemessen werden, kann auch keine Hagelableitung berechnet werden.

Berücksichtigt sind alle Regionen bis zur Seehöhe 1500 m, da bis dorthin die höchste Konzentration an Agrar- und Industriegütern besteht und kaum Beobachtungen vorliegen. Ebenfalls mit niedrigen Qualitätswerten von 0.15 berücksichtigt sind vereinzelte, kleine Regionen in denen eine im Vergleich zur Umgebung auffällig hohe Anzahl an Hagelereignissen gemessen wird. Nachdem die Qualitätskontrolle nur Hagelwerte bei zeitgleicher Gewitterdetektion zulässt, wird vermutet, dass eine lokal auftretende Überhöhung der Radarsignale bei konvektivem Niederschlag durch externe Störungen zu diesen Artefakten führen (vgl. auch Abbildung 14). Für diese Bereiche wurden in der Reanalyse die Werte aus einer Mittelung der Umgebung verwendet.

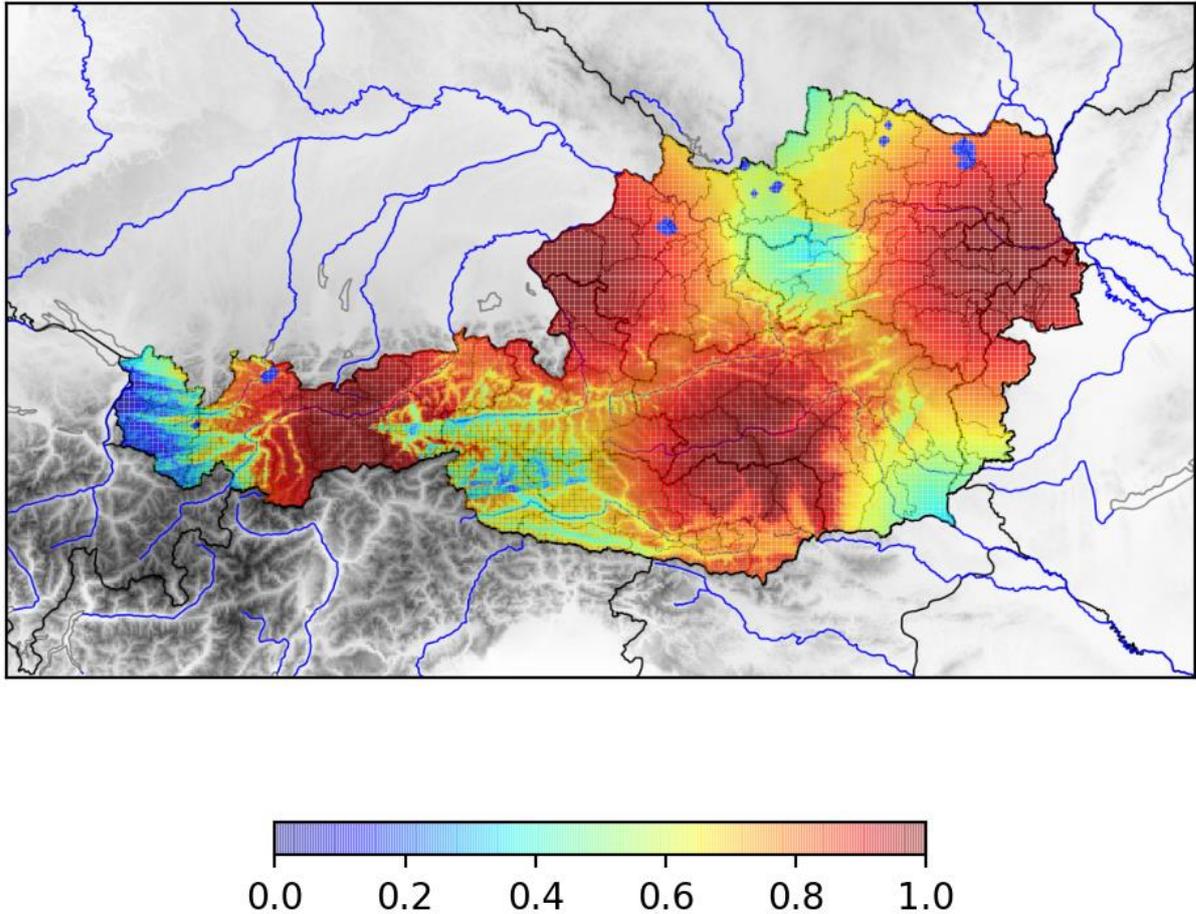


Abbildung 13: Qualitätskarte zur Erfassung von Hagelereignissen mit Radarmessung.

Die in Abbildung 13 dargestellte Qualitätskarte zeigt im Wesentlichen eine gute Messung im Nahbereich der vier Radaranlagen, die mit der Entfernung abnimmt. Sie zeigt aber auch die Beeinträchtigung der Messungen durch Strahlabschattung, insbesondere in den Tälern Südtirols, des westlichen Kärntens, im westlichen Inntal aber auch im Bereich des Mostviertels, des nördlichen Waldviertels und der südlichen Steiermark. Das Radar auf der Valluga (Tirol/Vorarlberg) wurde nicht berücksichtigt, da es seit Sommer 2017 von diesem Standort keine Daten mehr gibt.

Für die Interpretation der Wiederkehrperioden muss zusätzlich die zugrundeliegende Zählstatistik berücksichtigt werden. Die Anzahl der Hageltage schwankt zwischen einzelnen Regionen Österreichs erheblich, was einen wesentlichen Einfluss auf die Berechnung der Wiederkehrperioden hat. Die folgende Abbildung 14 zeigt eine Karte Österreichs mit der Anzahl der Hageltage (Tage mit kalibrierter Graupel- und Hagelkorngröße > 0 mm) im Beobachtungszeitraum. Besonders das Gebiet des Alpenhauptkammes sowie der äußerste Nordosten Niederösterreichs weisen hierbei eine sehr geringe Anzahl an Beobachtungen auf.

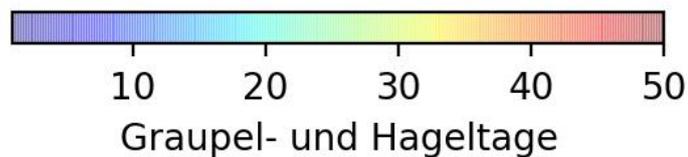
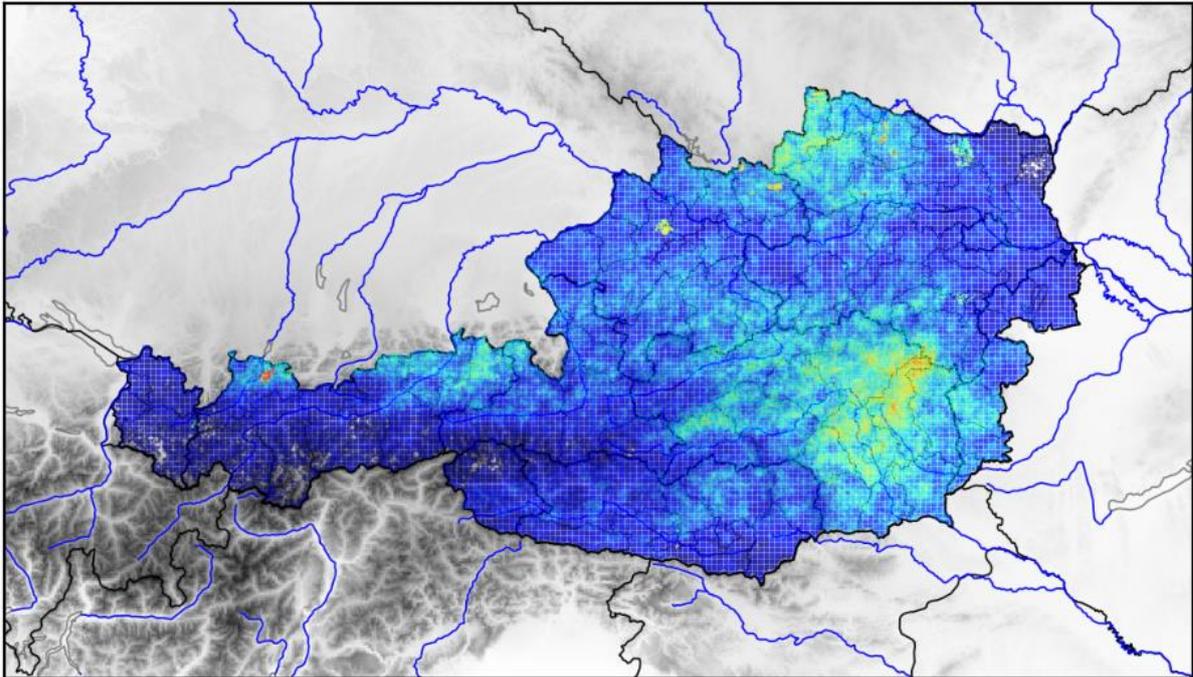


Abbildung 14: Anzahl der Graupel- und Hageltage im Untersuchungszeitraum.

Aufgrund des räumlich-zeitlichen Ansatzes und der Miteinbeziehung von atmosphärischen Einflussgrößen ist eine Berechnung von Wiederkehrperioden zwar insbesondere auch in Bereichen mit sehr geringer Datenlage (einstellige Anzahl von Hageltagen im Beobachtungszeitraum) möglich, die angegebenen Schätzungen sind jedoch mit entsprechender Vorsicht zu interpretieren. An einigen Gitterpunkten gibt es im gesamten Beobachtungsraum keinen einzigen Hageltag, was die Schätzung der Wiederkehrperioden an diesem Punkt gänzlich unmöglich macht. Dementsprechend fehlen für diese Bereiche auch die Werte.

Aufbauend auf die Ableitung der Qualitätskarte zur Erfassung von Hagelereignissen mit Radarmessungen (Abbildung 13) wird nun auch die Anzahl der Graupel- und Hageltage am Gitterpunkt auf ein spezifisches Qualitätsmaß normiert (siehe Tabelle 3) und mit dem Qualitätsmaß, dargestellt in Abbildung 13, multipliziert.

Tabelle 3: Parameter mit Auswirkungen auf die lokale Abschätzung von Wiederkehrperioden.

Parameter		Normierung		Intervall
Anzahl der Graupel- und Hageltage	numstat	qual(numstat)	[0 – 1]	[1 – 15]

Die Berechnung des lokalen Qualitätsmaßes zur Ableitung von Wiederkehrperioden ergibt nun:

$$Qualität = qual(numstat) * qual(h_{min}) * \frac{qual(h_{min}) + qual(h_{ext}) + qual(vol_{min})}{3}$$

Die berechnete Qualität wird in sechs Kategorien wie in Tabelle 4 unterteilt.

Tabelle 4: Qualitätsintervalle zur Ableitung von Vertrauenskategorien

Vertraungskategorie	Qualitätsintervall
0	0
1	(0, 0.2]
2	(0.2, 0.4]
3	(0.4, 0.6]
4	(0.6, 0.8]
5	(0.8, 1.0]

Die Kategorien geben qualitativ wieder, wie vertrauenswürdig die berechneten Wiederkehrperioden aufgrund der Einschränkungen der Radarmessung und der statistischen Aussagekraft vor Ort eingeschätzt werden. Sie stellen das gesamtheitliche Vertrauensmaß zu den Ergebnissen aus Abbildung 9 bis Abbildung 12 dar. Abbildung 15 zeigt eine Karte des Vertrauensmaßes.

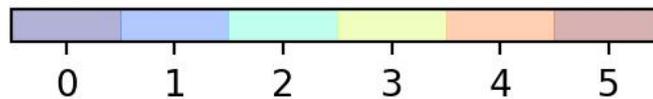
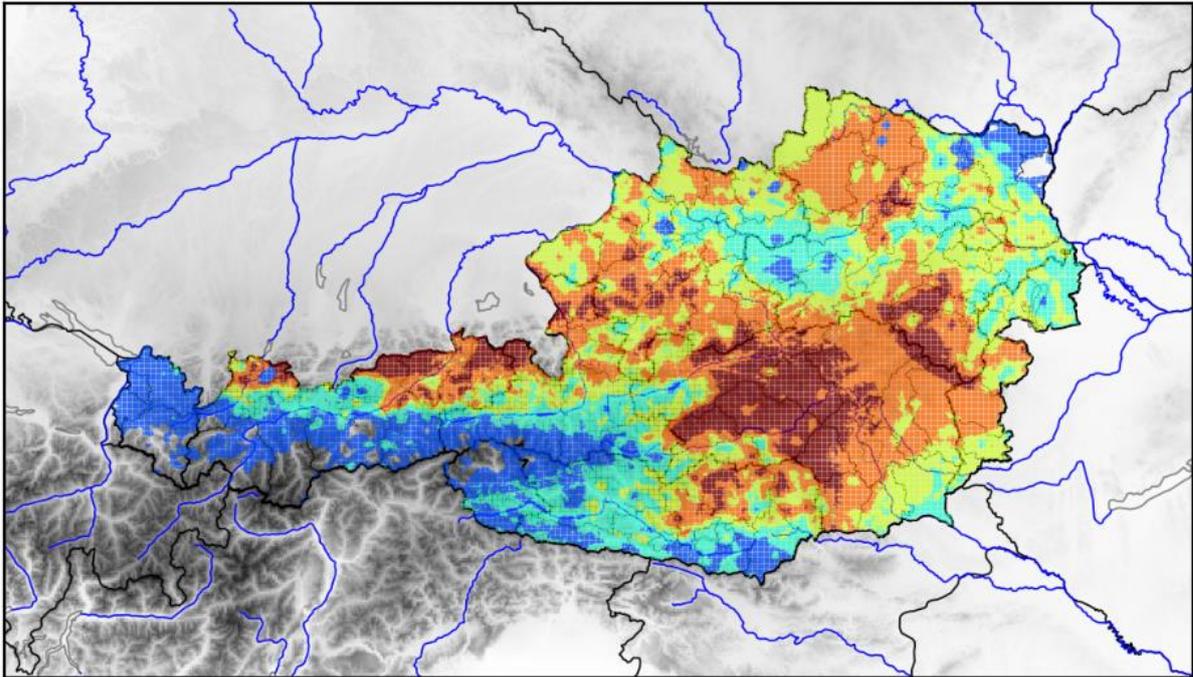


Abbildung 15: Karte mit Vertrauensmaß zur Berechnung von Wiederkehrperioden von Hagelereignissen.

5 Diskussion der Ergebnisse

Hagel stellt den Prototyp eines Extremereignisses dar, das nur selten auftritt und meistens nur kleine Flächen betrifft. An einem fixen Ort resultieren daraus also üblicherweise lange Wiederkehrzeiten, die sowohl die Beobachtung also auch die Modellierung mittels eines „Proxy“ (in diesem Fall Radardaten) und mittels Methoden der Extremwertstatistik erschweren, insbesondere in Kombination mit einem vergleichsweise kurzen Untersuchungszeitraum. Vor diesem Hintergrund lohnt es sich, die jeweiligen Stärken und Schwächen der drei für unsere Studie verwendeten „Bausteine“ näher zu diskutieren:

- Beobachtungen von Hagelkorngrößen geben direkt die „Ground Truth“ wieder, sind allerdings inhärent unvollständig. Das Fehlen einer Beobachtung heißt nicht zwingend, dass auch tatsächlich kein Hagel aufgetreten ist. Eine solche Dunkelziffer würde einerseits zu einer Unterschätzung des realen Auftretens aus den Beobachtungen alleine führen, andererseits könnte sie auch Artefakte in die räumlichen Strukturen einbringen.

- Radardaten liegen in hoher horizontaler Auflösung vor, messen allerdings nicht direkt die Hagelkorngrößen. Diese müssen durch (etablierte) indirekte Methoden, wie etwa MEHS, indirekt abgeschätzt und mit Hilfe von Beobachtungen kalibriert werden.
- Der metastatistische Ansatz zur Berechnung der Wiederkehrperioden von Extremwerten verwendet alle zur Verfügung stehenden Hageltage (und nicht nur jene mit Extremwerten) um die Verteilungsparameter bestmöglich zu bestimmen. Zusätzlich wird der Trainingsdatensatz durch weitere Eingangsgrößen (vgl. Tabelle 1) angereichert um die Zuverlässigkeit dieser Schätzung weiter zu erhöhen. Dieser Ansatz erlaubt eine vergleichsweise zuverlässige Abschätzung von mittleren Wiederkehrzeiten, die über die Länge des Trainingsdatensatzes hinausgehen (verlässlich bis zu einem Faktor von circa zwei, also im gegenständlichen Fall für bis zu 30-jährlichen Ereignissen).

Gewissermaßen handelt es sich hier um ein doppeltes „Undersampling“-Problem, das durch unsere Kombination dieser drei komplementären Ansätze auf die bestmögliche Weise abgemildert wird: Die Einführung von Radardaten bereinigt die Effekte eines unvollständigen (weil lückenhaften) Beobachtungsdatensatzes, die Verwendung von Extremwertstatistik jene eines ebenfalls unvollständigen (weil zu kurzen) Messdatensatzes. In beiden Fällen werden also die Unsicherheiten, die den jeweiligen Annahmen und Beziehungen unweigerlich innewohnen, als jeweils kleineres Übel in Kauf genommen, um die Eingangsdaten zu „reparieren“ und mögliche Artefakte zu eliminieren.

Das Problem eines unvollständigen Beobachtungsdatensatzes lässt sich nicht verhindern, hat sich allerdings durch die intensiviertere und systematisierte Suche nach Hagelmeldungen aus sozialen Medien und Feuerwehr-Einsatzinformation seit 2016 deutlich entschärft. Das Problem einer regional durch die Erdkrümmung und durch topografische Hindernisse eingeschränkten Radarsicht wurde durch die mitgelieferte Qualitätskarte adressiert.

Allerdings „leidet“ auch die Extremwertstatistik durch ein zu seltenes Auftreten von Hagel im Untersuchungszeitraum. Zwar erlauben der räumlich-zeitliche Ansatz und die Miteinbeziehung von atmosphärischen Einflussgrößen eine Berechnung von Wiederkehrperioden auch in Bereichen mit sehr geringer Datenlage, also einer einstelligen Anzahl von Hageltagen im Untersuchungszeitraum, die angegebenen Schätzungen sind jedoch mit entsprechender Vorsicht zu genießen. Insbesondere trifft dies auf die besonders hagelarmen Gebiete einerseits am westlichen Alpenhauptkamm und andererseits im äußersten Nordosten Niederösterreichs zu, wo die Radardaten an einigen Gitterpunkten im gesamten Untersuchungszeitraum keinen einzigen Hageltag nahelegen, was eine Schätzung der Wiederkehrperioden gänzlich unmöglich macht (Abbildung 14, siehe auch die weißen Flecken in den Darstellungen zu den Wiederkehrperioden).

Verschärft wird dieser Umstand dadurch, dass ausgerechnet diese Regionen nur von einem einzigen Radarstandort hinreichend gut abgedeckt werden (dem Patscherkofel oberhalb von Innsbruck beziehungsweise Rauchenwarth beim Flughafen Schwechat). Dies kann insofern problematisch sein, weil in einer Region mehrere Gewitter zur selben Zeit auftreten und der Radarstrahl bei jeder Durchdringung eines Niederschlagsfeldes abgeschwächt wird. Ist nur ein einziger Radarstandort in der Nähe, ist es in solchen Situationen also wahrscheinlicher, dass dessen „Sichtachse“ verdeckt ist, als wenn zwei oder gar drei verfügbare Radarstandorte eine Redundanz erzeugen. Diese mögliche Unterschätzung lässt sich nicht quantifizieren und ließe sich auf eine einfache Weise nur durch eine Verwendung von Radardaten von grenznahen Radarstandorten aus dem benachbarten Ausland lösen. Im Gegensatz dazu wirken die modellierten Häufigkeiten von großem Hagel über dem Bergland verglichen mit subjektiven Erfahrungswerten etwas zu hoch, insbesondere in der Obersteiermark, aber auch im angrenzenden südlichen Niederösterreich sowie im Waldviertel. In diesen Gebieten entstehen viele Gewitter und produzieren auch oft Hagel, allerdings ist dieser in den bevorzugten Entstehungsgebieten meist nur klein. Große Hagelkörner – wenn auch oft nicht sehr dicht fallend – werden hingegen häufiger erst dann beobachtet, wenn sich Gewitter von den Bergen lösen und ins angrenzende Hügel- und Flachland ziehen. Möglicherweise hat der MEHS-Algorithmus also Schwierigkeiten, wenn hohe Radarreflektivitäten durch viele kleine Hagelkörner zustande kommen, und neigt dann zur Überschätzung der modellierten Hagelkorngröße. Zu einem gewissen Grad kommt aber auch in Frage, dass tatsächlich auch schon am unmittelbaren Entstehungsort von Gewittern gelegentlich großer Hagel auftritt, allerdings wegen der geringen Bevölkerungsdichte im gebirgigen Gelände nicht beobachtet oder gemeldet wird.

In diesen beiden beschriebenen Fällen stehen also regional systematische Unter- beziehungsweise Überschätzungen des Auftretens von Hagel im Raum, die auf tatsächliche und zumindest subjektiv bekannte klimatologische Muster aufsetzen und sich daher kaum isolieren und entfernen lassen. Zudem wirkt eine mögliche Behebung umso aufwändiger, weil die beschriebenen, möglichen Artefakte bereits in der Radaranalyse entstehen und nicht erst aus der verwendeten Methodik.

Diese beiden mutmaßlichen, kleinen Schwächen sollen allerdings nicht schmälern, dass die durchgeführte Studie durchwegs plausible Wiederkehrzeiten für bestimmte Hagelkorngrößen für ganz Österreich produziert und auch die im Alpenraum bekannten klimatologischen Muster ausgezeichnet wiedergibt. Das Vorkommen von Hagel weist ausgeprägte Maxima entlang der Alpenränder und in den angrenzenden Vorländern auf, während es einerseits mit steigender Entfernung von den Bergen abnimmt und andererseits (großer) Hagel im Hochgebirge kaum vorkommt. Die vorliegenden Daten und Karten können also als die zum gegenwärtigen Zeitpunkt bestmögliche Abschätzung der

Hagelgefährdung in Österreich auf Basis der verfügbaren Beobachtungs- und Messdaten sowie von „State-of-the-art“-Methoden angesehen werden.

6 Danksagung

Wir möchten der Österreichischen Hagelversicherung zur Aufbereitung ihrer Schadensmeldungen sehr herzlich danken. Des Weiteren möchten wir Jun.-Prof. Dr. Katharina Schröder von der Universität Freiburg für den intensiven und offenen fachlichen Austausch, sowie Dr. Petr Novak vom Czech Hydrometeorological Institute und Dr. Katarina Skripnikova vom Institute of Atmospheric Physics CAS für die Diskussion und den Austausch der Ergebnisse an den österreichisch – tschechischen Grenzgebieten danken. Ebenfalls danken möchte wir Dr. Rudolf Kaltenböck von der Austro Control GmbH für die Recherche und Diskussion zur Interpretation der Radarmessungen und deren Eigenschaften.

7 Literatur und Quellen

- Allen, J. T., Giammanco, I. M., Kumjian, M. R., Jurgen Punge, H., Zhang, Q., Groenemeijer, P., Kunz, M., & Ortega, K. (2020). Understanding hail in the earth system. *Reviews of Geophysics*, 58(1), e2019RG000665.
- Barras, H., Hering, A., Martynov, A., Noti, P. A., Germann, U., & Martius, O. (2019). Experiences with > 50,000 crowdsourced hail reports in Switzerland. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100(8), 1429-1440.
- Falkensteiner, M. A., Schellander, H., Ehrensperger, G., & Hell, T. (2023). Accounting for seasonality in the metastatistical extreme value distribution. *Weather and Climate Extremes*, 42, 100601.
- Germann, U., Boscacci, M., Clementi, L., Gabella, M., Hering, A., Sartori, M., Sideris I.V., & Calpini, B. (2022). Weather radar in complex orography. *Remote Sensing*, 14(3), 503.
- Haiden, T., Kann, A., Wittmann, C., Pistotnik, G., Bica, B., & Gruber, C. (2011). The Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis (INCA) system and its validation over the Eastern Alpine region. *Weather and Forecasting*, 26(2), 166-183.
- Kaltenboeck, R. (2012, June). New generation of dual polarized weather radars in Austria. In *Proceedings of the 7th European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology (ERAD), Toulouse, France* (pp. 24-29).
- Marani, Marco, and Massimiliano Ignaccolo. A metastatistical approach to rainfall extremes. *Advances in Water Resources* 79 (2015): 121-126.
- Meyer, V., Tüchler, L., Tollardo, M., Cenzone, G., & Domenichini, F. (2014, May). A convection climatology of the inner alpine region based on radar and lightning data. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (p. 12001).
- Witt, A., Eilts, M. D., Stumpf, G. J., Johnson, J. T., Mitchell, E. D. W., & Thomas, K. W. (1998). An enhanced hail detection algorithm for the WSR-88D. *Weather and Forecasting*, 13(2), 286-303.

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Korrelation zwischen beobachteten Hagelkorngrößen und dem Radarparameter MEHS (links) sowie den kalibrierten Hagelkorngrößen (rechts) aus Radardaten dargestellt als Häufigkeitshistogramm (siehe Text).....	9
Abbildung 2: Korngrößenverteilungen aus zwei unterschiedlichen Hagelereignissen.....	10
Abbildung 3: Maximale im Untersuchungszeitraum abgeschätzte Hagelkorngröße [cm].....	11
Abbildung 4: Jährliche Häufigkeit von Hagelereignissen mit modellierten Hagelkorngrößen ab 1 cm im Untersuchungszeitraum.....	12
Abbildung 5: Jährliche Häufigkeit von Hagelereignissen mit modellierten Hagelkorngrößen ab 2 cm im Untersuchungszeitraum.....	13
Abbildung 6: Jährliche Häufigkeit von Hagelereignissen mit modellierten Hagelkorngrößen ab 3 cm im Untersuchungszeitraum.....	14
Abbildung 7: Absolute Häufigkeit von Hagelereignissen mit modellierten Hagelkorngrößen ab 4 cm im Untersuchungszeitraum.....	15
Abbildung 8: Absolute Häufigkeit von Hagelereignissen mit modellierten Hagelkorngrößen ab 5 cm im Untersuchungszeitraum.....	16
Abbildung 9: Österreichkarte mit Hagelkorngrößen [cm] für eine 10-jährliche Wiederkehrperiode.	18
Abbildung 10: Österreichkarte mit Hagelkorngrößen [cm] für eine 20-jährliche Wiederkehrperiode ...	19
Abbildung 11: Österreichkarte mit Hagelkorngrößen[cm] für eine 25-jährliche Wiederkehrperiode	20
Abbildung 12: Österreichkarte mit Hagelkorngrößen[cm] für eine 30-jährliche Wiederkehrperiode	21
Abbildung 13: Qualitätskarte zur Erfassung von Hagelereignissen mit Radarmessung.....	24
Abbildung 14: Anzahl der Graupel- und Hageltage im Untersuchungszeitraum.	25
Abbildung 15: Karte mit Vertrauensmaß zur Berechnung von Wiederkehrperioden von Hagelereignissen.	27