

# Gewitter und Hagel



Foto: Blitzentladung (Erdblitz). (Foto: M. Edlinger)

**Autor und Autorin:**

Georg Pistornik  
Vera Meyer

# Inhaltsverzeichnis

<b>8 Gewitter und Hagel</b> .....	189
8.1 Einleitung .....	191
8.2 Beobachtung und Messung von Gewittern und Hagel .....	191
8.2.1 Beobachtete Gewitter- und Hageltage .....	191
8.2.2 Blitzortung .....	191
8.2.3 Beobachtung von Hagel mit dem Niederschlagsradar .....	191
8.2.4 Feuerwehr-Einsatzdaten und Meldungen von Augenzeugen .....	191
8.2.5 Der „beste Mix“ aus allen Datenquellen .....	192
8.3 Meteorologische Bedingungen für die Bildung von Gewittern und Hagel .....	192
8.4 Räumliche, saisonale und tageszeitliche Verteilung von Gewittern .....	192
8.4.1 Räumliche Verteilung .....	192
8.4.2 Saisonale Verteilung .....	194
8.4.3 Tageszeitliche Verteilung .....	199
8.5 Räumliche, saisonale und tageszeitliche Verteilung von Hagel .....	200
8.5.1 Räumliche Verteilung .....	200
8.5.2 Saisonale und tageszeitliche Verteilung .....	202
8.6 Diskussion .....	202
8.7 Gewitter und Hagel im Klimawandel .....	203

# 8.1 Einleitung

Gewitter sind die eindrucksvollsten, aber auch gefährlichsten Wettererscheinungen unserer geographischen Breiten. Einerseits tragen sie in der warmen Jahreszeit vielerorts zu mehr als der Hälfte des Niederschlags bei, sind also immens wichtig nicht nur für die Natur als Ganzes, sondern im engeren Sinne auch für unsere Wasser- und Ernährungsversorgung. Andererseits fallen die Niederschläge bei Gewittern oft in intensiver Form und kurzer Zeit, sodass Überflutungen, Murenabgänge und Erdrutsche daraus resultieren können. Hagelschlag, Sturmböen und – zum Glück nur sehr selten – auch Tornados sind weitere Phänomene, die manche Gewitter begleiten, Schä-

den anrichten und im Extremfall sogar eine unmittelbare Gefahr für Leib und Leben darstellen können.

Nicht zuletzt geht ein weiteres Gefahrenmoment auch von den Blitzentladungen selbst aus, die das Definitionsmerkmal eines Gewitters darstellen. Ein Gewitter wird laut WMO definiert als „eine oder mehrere plötzliche elektrische Entladungen, die sich durch einen Lichtblitz (Blitz) und ein scharfes oder grollendes Geräusch (Donner) äußern.“ Gewitter sind überwiegend kleinräumige und kurzlebige Phänomene, aber unter günstigen Voraussetzungen können sie auch zu großen Systemen

anwachsen, stundenlang „leben“ und hunderter Kilometer zurücklegen.

Die Steiermark gehört zu den Regionen mit der größten Gewitter- und Hagelgefährdung, nicht nur in Österreich, sondern sogar in ganz Europa. Der versicherte Anteil der volkswirtschaftlichen Schäden, den Gewitter und ihre Begleiterscheinungen an Gebäuden, Fahrzeugen, sonstigem Eigentum und landwirtschaftlichen Kulturen anrichten, lässt sich für die Steiermark alljährlich mit einem zweistelligen Millionenbetrag abschätzen. In den ungünstigsten Jahren kann er durchaus auch die Schwelle von 100 Mio. Euro überschreiten.

# 8.2 Beobachtung und Messung von Gewittern und Hagel

Die größte Herausforderung bei der Beobachtung von Gewittern und Hagel ist der Mangel an vollständigen und einheitlichen Aufzeichnungen über deren Auftreten. Die Informationen dazu müssen aus unterschiedlichsten Quellen zusammengetragen werden, deren Verfügbarkeit im Laufe der Zeit einen stetigen Wandel erfahren hat.

## 8.2.1 Beobachtete Gewitter- und Hageltage

Langjährige Informationen über die Anzahl von Gewitter- und Hageltagen liegen lediglich von jenen Wetterstationen vor, die durchgehend und verlässlich von Beobachtern betreut wurden. Die meisten Wetterbeobachtungen werden allerdings lediglich ehrenamtlich durchgeführt und Schwankungen der Beobachtungsqualität schmälern die Vergleichbarkeit der Aufzeichnungen.

In den letzten Jahrzehnten haben traditionelle Wetterbeobachtungen zudem an Bedeutung verloren. Einerseits wurde es durch den gesellschaftlichen Wandel immer schwieriger, noch Freiwillige für eine Aufgabe zu finden, die so viel Ortsgebundenheit und Hingabe erfordert, andererseits wurde von Wetterdiensten auch aktiv eine Einsparung vorangetrieben, da man nicht nur Gewitter und Hagel, sondern auch andere bisher klassische Beobachtungsgrößen stattdessen immer besser mit Fernerkundungsmethoden erfassen kann. Die für Gewitter und Hagel wichtigsten Fernerkundungen sind Blitzortungs- und Niederschlagsradardaten.

## 8.2.2 Blitzortung

Das österreichische Blitzortungssystem ALDIS („Austrian Lightning Detection and Information System“) registriert seit 1992 Blitz-

entladungen mittels acht über Österreich verteilten Sensoren sowie weiteren Sensoren aus den Nachbarländern, deren Daten im europäischen Netzwerk EUCLID („European Cooperation for Lightning Detection“) miteinander synchronisiert werden. Aus den Laufzeiten der elektromagnetischen Impulse werden die Blitzentladungen in Echtzeit verortet und ihre Stromstärken gemessen.

Eine Blitzentladung kann sich entweder ohne Bodenkontakt (Wolke-Wolke-Blitz) oder mit Bodenkontakt (Wolke-Erde-Blitz) ausbilden. Auch kann ein und dieselbe Blitzentladung aus mehreren zeitlich oder räumlich versetzten Teilentladungen bestehen, die von einem Gruppierungsalgorithmus zu Haupt- und Nebenblitzen eines Blitzereignisses zusammengefasst werden.

## 8.2.3 Beobachtung von Hagel mit dem Niederschlagsradar

Anders als die Blitzaktivität entzieht sich Hagel einer lückenlosen Vermessung. Eine indirekte Abhilfe schaffen Niederschlagsradardaten, die mit Informationen über die Höhe der Nullgradgrenze verschnitten werden und so empirische Abschätzungen über die Wahrscheinlichkeit und Größe von Hagel erlauben. Für die Bestimmung dieser Hagelparameter analysiert das „Austrian Thunderstorm Nowcasting Tool“ (A-TNT) der GeoSphere Austria (Meyer et al., 2014) deshalb die dreidimensionale Niederschlagsstruktur und die Blitzaktivität in Gewitterwolken auf bekannte Hagelsignaturen, die mit Hilfe von beobachteten Hagelkorngrößen aus vergangenen Ereignissen kalibriert werden. Wegen bestehenden Unsicherheiten in der Radarmessung (Allen et al., 2022) und in den Beobachtungsdaten (Barra et al., 2019) sowie wegen des zeitlich und räumlich stark veränderlichen Spektrums von Korngrößen in einem Hagelereignis (Germann

et al., 2022) reproduzieren diese Abschätzungen nicht in jedem Einzelfall die tatsächlichen Beobachtungen. Dennoch können die Ergebnisse durch bestmögliche Kalibrierung als wahrscheinlichste maximale Hagelkorngröße interpretiert werden (Witt et al., 1998).

Die Radardaten stammen von der Österreichischen Gesellschaft für Zivilluftfahrt (Austro Control GmbH; Kaltenböck, 2012). Die Messungen der vier Radarstandorte werden in einem österreichweiten Komposit von 14 Reflektivitätsklassen mit fünfminütiger Auflösung auf einem  $1 \times 1 \times 1 \text{ km}^3$ -Gitter für 1 bis 16 km Höhe zur Verfügung gestellt. Demzufolge beträgt auch die Auflösung der kalibrierten Hagelkorngrößen fünf Minuten und  $1 \times 1 \text{ km}^2$ .

## 8.2.4 Feuerwehr-Einsatzdaten und Meldungen von Augenzeugen

Seit 2016 wird die oft unbefriedigende Lücke in der „Ground-Truth“-Information über auftretende Unwetter und deren Auswirkungen an der GeoSphere Austria erfolgreich mit zwei nicht-konventionellen Datenquellen geschlossen: einerseits Feuerwehr-Einsatzdaten und andererseits Beobachtungen, die über das Wettermelden-Portal (<https://www.wettermelden.at>) von jeder Person per Smartphone oder Computer abgesetzt werden können. Gerade Hagel ist ein so eindrucksvolles und gleichzeitig leicht zu beobachtendes Phänomen, das sich sowohl aus der Bevölkerung als auch aus der Dokumentation von Feuerwehren durch eine große Anzahl an Meldungen extrahieren lässt. Ironischerweise erfahren damit also auch ehrenamtliche Wetterbeobachtungen wieder eine Renaissance in neuem Gewand, indem sie durch einen niederschwelligen Zugang ohne Verpflichtung örtlicher und zeitlicher Bindung attrahiert werden.

### 8.2.5 Der „beste Mix“ aus allen Datenquellen

Die obigen Hagelbeobachtungen wurden durch eine aktive Recherche in sozialen Medien vervollständigt. Insgesamt ließen sich auf diese Weise pro Jahr durchschnittlich rund 400 Dokumentationen von großem Hagel

( $\geq 2$  cm Durchmesser) in der Steiermark finden. Ältere Hagelbeobachtungen vor 2016 wurden aus der European Severe Weather Database (<https://eswd.eu/>) und einer früheren Initiative zur internen Sammlung aus Medienberichten ergänzt.

Die Hagelsignaturen aus den Radardaten wurden mit diesem Beobachtungsdatensatz

kalibriert. Als Kompromiss zwischen einem ausreichend langen Zeitraum und einem dennoch weitgehend homogenen (einheitlichen) Datenmaterial wurden die Blitzortungs- und Radardaten für die Periode 2012 – 2021 herangezogen.

## 8.3 Meteorologische Bedingungen für die Bildung von Gewittern und Hagel

Für die Bildung eines Gewitters ist ein Zusammentreffen der folgenden drei Bedingungen („Zutaten“) in der Atmosphäre nötig:

1. eine instabile Luftsichtung, also eine starke Temperaturabnahme vom Boden bis in die obere Troposphäre (5 – 10 km Höhe),
2. ausreichende Luftfeuchtigkeit für die Kondensation von Wasserdampf und damit die Bildung von Wolken sowie
3. ein Auslösungsmechanismus in Form einer Hebung von Luftmassen.

Wasserdampf als Maß für die Luftfeuchtigkeit setzt bei der Kondensation zu Wolken seine sogenannte latente Wärme frei und kann daher als der „Treibstoff“ für Gewitter angesehen werden. Im Falle einer instabilen Luftsichtung bleiben aufsteigende Luftblasen mit Wolkenbildung wärmer als ihre Umgebung und erfahren einen Auftrieb, der die Quellwolken in die Höhe wachsen lässt und ihnen ihr charakteristisches, karfiol förmiges Aussehen verleiht.

Die dritte Bedingung für Gewitter, eine Hebung von Luftmassen, kann je nach Wetterlage und Topographie auf vielfältige Weise auftreten. Typischerweise wird eine Luftmasse durch eine großräumige, aber schwache Hebung an der Vorderseite von Tiefdruckgebieten und/oder bei Warmluftzufuhr für Gewitterbildungen „vorbereitet“, sodass es dann wahrscheinlicher wird, dass kleinräumige, aber intensivere Hebungsprozesse sie aktiv auslösen. Diese Auslösungsmechanismen können sowohl thermischer Natur (vor allem Tal- und

Hangwindsysteme) als auch dynamischer Natur (vor allem Wetterfronten – meist Kaltfronten, seltener Warmfronten) sein. Thermisch ausgelöste Gewitter werden als Luftmassengewitter (oder umgangssprachlicher Wärmegegitter), dynamisch ausgelöste Gewitter als Frontgewitter bezeichnet. Nicht selten spielen beide Mechanismen eine Rolle oder lassen sich nicht klar trennen. Die Gültigkeit und Nachvollziehbarkeit dieser konzeptionellen Unterscheidung wird dadurch allerdings nicht geschmälert.

Hagel wird zwar im Inneren jeder Gewitterwolke produziert, weil die elektrische Ladungstrennung und das Wachstum von Eiskörnern Hand in Hand gehen, in den meisten Fällen schmelzen diese allerdings bis zum Boden großteils oder sogar vollständig zu Regentropfen. Bei „gewöhnlichen“ Gewittern, die nur vom thermischen Auftrieb leben, wird also fast ausschließlich kleiner Hagel beobachtet, der lediglich bei den instabilsten Luftsichtungen etwa 2 cm oder sogar 3 cm Korngröße erreichen kann.

Die Bildung von noch größerem, schadensträchtigem Hagel wird erst durch eine vierte „Zutat“ ermöglicht, nämlich durch eine vertikale Windscherung – eine Änderung von Windrichtung und/oder Windgeschwindigkeit mit steigender Höhe. Unter ihrem Einfluss neigen sich Gewitterwolken, sodass sich der Niederschlag und der dadurch gekühlte Abwind systematisch auf eine Seite verschieben, ohne das weitere Einströmen und Aufsteigen von warmer, feuchter Luft von der anderen

Seite zu behindern. Eine solche Organisation mit getrenntem Auf- und Abwindbereich verleiht Gewittern daher eine längere Lebensdauer und heftigere Wettererscheinungen.

Die eindrucksvollsten und gleichzeitig gefährlichsten organisierten Gewitter sind sogenannte Superzellen, deren Aufwind nicht nur vollkommen vom Abwind getrennt ist, sondern die vorhandene Windscherung auch in eine Rotation um eine annähernd vertikale Achse umsetzen kann. Infolge der Rotation wird der Aufwind einerseits weniger durch Turbulenz geschwächt und erfährt andererseits über den rein thermischen Auftrieb hinaus auch noch eine dynamische (erzwungene) Beschleunigung, wird also regelrecht nach oben gesaugt. Superzellen müssen nicht zwingend großen Hagel bringen, allerdings sind sie prädestiniert dafür. Ihr einziges Definitionsmerkmal ist ihre Rotation, die per Augenbeobachtung oder mittels Doppler-Radar nachweisbar ist und nicht das Auftreten von Hagel oder anderen heftigen Wettererscheinungen. Bei fast jedem Hagelschlag mit beobachteten Korngrößen über 3 cm lässt sich zumindest eine leichte Rotation der Gewitterwolke nachweisen.

Starke vertikale Windscherung ist im Wesentlichen gleichbedeutend mit starken Höhenwinden, also vor allem unter dem Westwindband (Jetstream) anzutreffen. In geringerem Ausmaß wird sie allerdings auch systematisch durch thermische Windsysteme (Tal- und Hangaufwinde) entlang der Alpenränder erzeugt oder verstärkt.

## 8.4 Räumliche, saisonale und tageszeitliche Verteilung von Gewittern

### 8.4.1 Räumliche Verteilung

Die räumliche Verteilung von Gewittern in der Steiermark wurde auf zwei Arten, anhand der Gewittertage und anhand der Blitzdichte, untersucht.

Für die Gewittertage wurden Blitzentladungen der Periode 2012 – 2021 innerhalb eines bestimmten Radius in ein hörbares Gewitter an

einem Ort übersetzt. Auf diese Weise werden also die traditionellen Beobachtungen simuliert. Die Wahrnehmbarkeit von Gewittern kann in Abhängigkeit von sowohl meteorologischen als auch nicht-meteorologischen Faktoren sehr variabel sein. Die beste mittlere Hörweite wurde empirisch durch einen Abgleich von Blitzdaten und tatsächlichen Gewitterbeobachtungen mit 15 km ermittelt. Auch Donner

aus Wolke-Wolke-Blitzen sind hörbar, daher wurden für diese Untersuchung alle von ALDIS georteten Blitze herangezogen. Nachdem fast jedes Gewitter im Verlauf seines Lebenszyklus auch Wolke-Erde-Blitze produziert, ist die Anzahl der Gewittertage aber ohnehin robust gegenüber dieser Entscheidung.

Die meisten Gewittertage, nämlich durchschnittlich 45 – 50 pro Jahr, treten in der

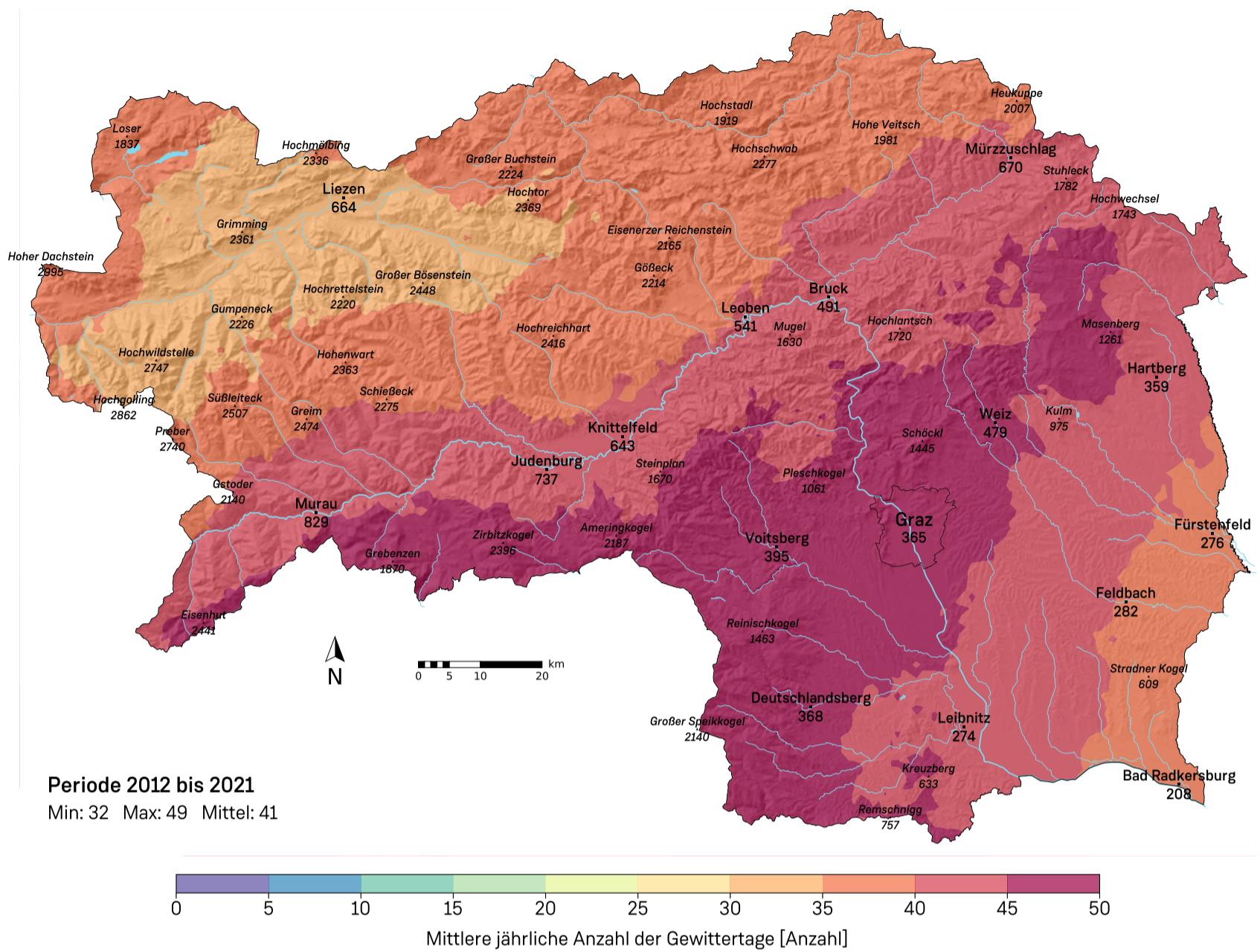


Abbildung 8.1: Mittlere jährliche Anzahl der Gewittertage (mit der Annahme einer Hörweite von 15 km) im Zeitraum 2012 – 2021. Datengrundlage: Blitzortungsdaten von ALDIS.

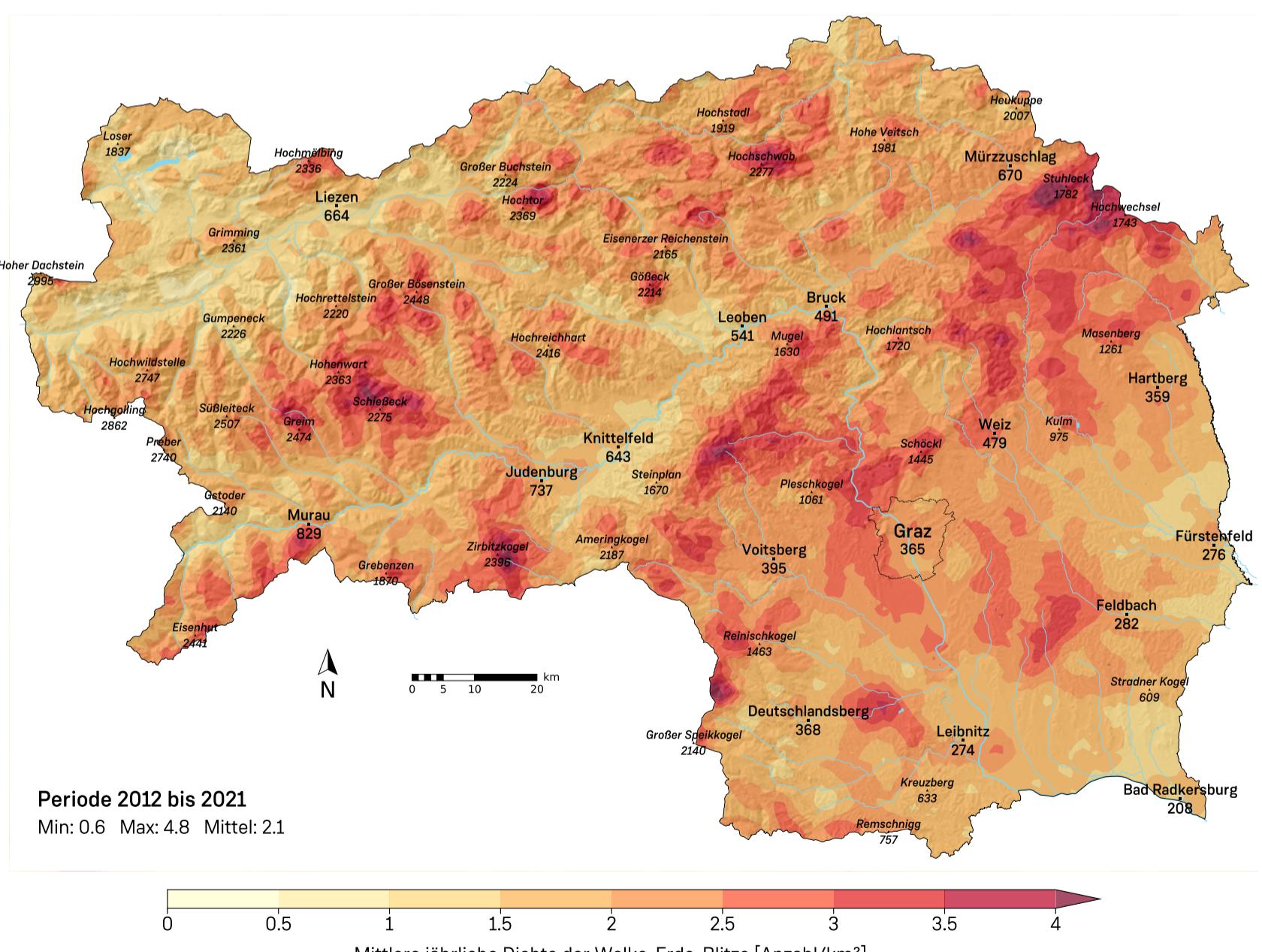


Abbildung 8.2: Mittlere jährliche Dichte der Wolke-Erde-Blitze pro Quadratkilometer (gemittelt auf 13 km<sup>2</sup> um jeden Punkt) jeweils für das gesamte Jahr im Zeitraum 2012 – 2021. Datengrundlage: Blitzortungsdaten von ALDIS.

Steiermark entlang des Randgebirges, daran angrenzend in der nordwestlichen Hälfte des Grazer Beckens sowie generell in Grenznähe zu Kärnten auf (Abbildung 8.1). Von dort nimmt die Häufigkeit von Gewittern sowohl nach Südosten als auch nach Norden allmählich ab. Von Leibnitz bis Hartberg sowie in der Mur-Mürz-Furche kann mit 40 bis 45, von Bad Radkersburg bis Fürstenfeld sowie in den Niederen Tauern, Eisenerzer Alpen und in der Hochsteiermark mit 35 bis 40 Gewittertagen pro Jahr gerechnet werden. Selbst die steiermarkweit niedrigste Anzahl von durchschnittlich 30 bis 35 Gewittertagen pro Jahr im oberen Ennstal und im Ausseerland liegt immer noch im Bereich des österreichischen Durchschnitts.

Um eine möglichst einheitliche Datenbasis über den Beobachtungszeitraum zu garantieren, beschränkt sich die Analyse der mittleren jährlichen Blitzdichte auf die Hauptereignisse der Wolke-Erde-Blitze (in der Folge als „Blitzschläge“ bezeichnet), die von ALDIS über den gesamten Zeitraum am vollständigsten aufgezeichnet werden konnten. Insgesamt ähneln die räumlichen Muster der Blitzdichte jenen der Gewittertagen. Die Strukturen sind allerdings wesentlich feiner, obwohl die schärfsten Spitzen und das größte Rauschen bereits durch eine Mittelung über  $13 \text{ km}^2$  um den betrachteten Punkt eliminiert wurden (Abbildung 8.2).

Zwar ist keine einfache Höhenabhängigkeit erkennbar (die höchsten Blitzdichten treten eher im mittelhohen Randgebirge auf), aber zumindest lokal spielt die Höhenlage offenbar eine wichtige Rolle: In der Obersteiermark und entlang des Randgebirges treten viele Gebirgsgruppen deutlich in Form von kleinräumigen Maxima der Blitzdichte bis über vier Blitzschläge pro Quadratkilometer und Jahr hervor, während die Talböden oft nur rund einen Blitzschlag pro Quadratkilometer und Jahr abbekommen. Schwächer, aber trotz der nur geringen Höhenunterschiede immer noch erkennbar ist dieses Muster im Grazer Becken, in dessen Umfeld die Riedel von Graz bis Bad Gleichenberg sowie zwischen Deutschlands-

berg und Leibnitz oft drei bis vier, hingegen das Raab- und Murtal meist weniger als zwei Blitzschläge pro Quadratkilometer und Jahr abbekommen.

Die punktuell größten Maxima mit rund fünf Blitzschlägen pro Quadratkilometer und Jahr liegen im Grenzgebiet zu Niederösterreich rund um Stuhleck, Sonnwendstein und Hochwechsel. Diese Berge sind auch innerhalb der ohnehin schon gewitterreichen Umrahmung des Grazer Beckens als besonders häufige Entstehungsorte von Gewittern bekannt. Ihre Kegelform und die Nachbarschaft zu feuchtem Tiefland optimieren den Transport von Luftfeuchtigkeit durch die Tal- und Hangwindsysteme in die über den Gipfeln aufsteigenden Thermikblasen.

Bei der Mittelung über größere Flächen wandert die maximale Blitzdichte etwas mehr nach Südwesten. Laut den Auswertungen von ALDIS war im Zeitraum 2012 – 2021 Miesenbach bei Birkfeld die Gemeinde mit der höchsten Blitzdichte in der Steiermark und ganz Österreich (3,23 Blitzschläge pro Quadratkilometer und Jahr). Sie liegt im Bezirk Weiz, der seinerseits mit 2,28 Blitzschlägen pro Quadratkilometer und Jahr den blitzreichsten Bezirk Österreichs darstellt.

#### 8.4.2 Saisonale Verteilung

Die Abbildungen 8.3 – 8.8 stellen die mittlere Anzahl an Gewittertagen sowie die mittlere Blitzdichte für den meteorologischen Frühling (1. März bis 31. Mai), Sommer (1. Juni bis 31. August) und Herbst (1. September bis 30. November) gegenüber. Dabei werden die starken Jahresgänge der Gewittertätigkeit offensichtlich. Im Sommer ist sie am intensivsten und prägt daher auch maßgeblich die räumlichen Muster des ganzen Jahres. Im Frühling treten in der Steiermark im Mittel meist fünf bis zehn, lediglich vom Joggland bis ins zentrale und westliche Grazer Becken etwas mehr als zehn Gewittertagen pro Jahr auf. Im Herbst sind es von der Koralpe bis ins Leibnitzer Feld

überhaupt nur noch rund fünf Gewittertagen, im restlichen Land noch weniger. Auch bei der Blitzdichte lassen sich sowohl im Frühling als auch im Herbst nur wenige kleine Gebiete entlang des Randgebirges erkennen, in denen durchschnittlich mehr als 0,5 Blitzschläge pro Quadratkilometer und Jahreszeit auftreten. Im meteorologischen Winter (1. Dezember bis 28./29. Februar) sind Gewitter so seltene und blitzarme Ereignisse, dass sie praktisch keinen Fußabdruck in den Daten hinterlassen und daher auf die Darstellung eigener Karten verzichtet wurde.

Mehr als 80% aller Gewittertagen und mehr als 90% aller Blitzschläge im Jahresverlauf treten von Mai bis August auf, über 90% beziehungsweise über 95% von April bis September. Insgesamt ist die Gewittersaison ziemlich symmetrisch und gipfelt um die Monatswende vom Juni zum Juli. Bei noch feinerer – beispielsweise monatlicher statt saisonaler – Aufgliederung fällt auf, dass die Saison im Flach- und Hügelland etwas früher beginnt als im höheren Bergland. Der in höheren Lagen verzögerte Start lässt sich durch die längere Schneedeckung und die spätere Vegetationsentwicklung erklären, welche die lokale Aufheizung und Anfeuchtung von Luftmassen bremsen. Innerhalb der Steiermark macht diese Verschiebung maximal einen Monat aus, sodass im Mittel im Grazer Becken schon der Juni, hingegen in der Obersteiermark erst der Juli der gewitterreichste Monat ist. In hochalpinen Lagen, wie etwa den Hohen Tauern im benachbarten Salzburg, fällt dieser überhaupt erst auf den August.

Luftmassengewitter weisen einen besonders starken Jahresgang auf und setzen im Winterhalbjahr völlig aus. Mehr oder weniger regelmäßig treten sie von Ende April bis Anfang September auf. Die frühesten Luftmassengewitter wurden schon Ende März und die spätesten Anfang Oktober registriert. In der Nebensaison sind sie allerdings an übernormale Temperaturverhältnisse gebunden. Der Jahresgang von Frontgewittern ist etwas



Foto 8.1: „Squall-Line“ einer herannahenden Gewitterzelle in der südöstlichen Steiermark bei Kapfenstein. Im Vorfeld der Böenline kommt es zu stürmischem Wind. (Foto: P. Seibitz)

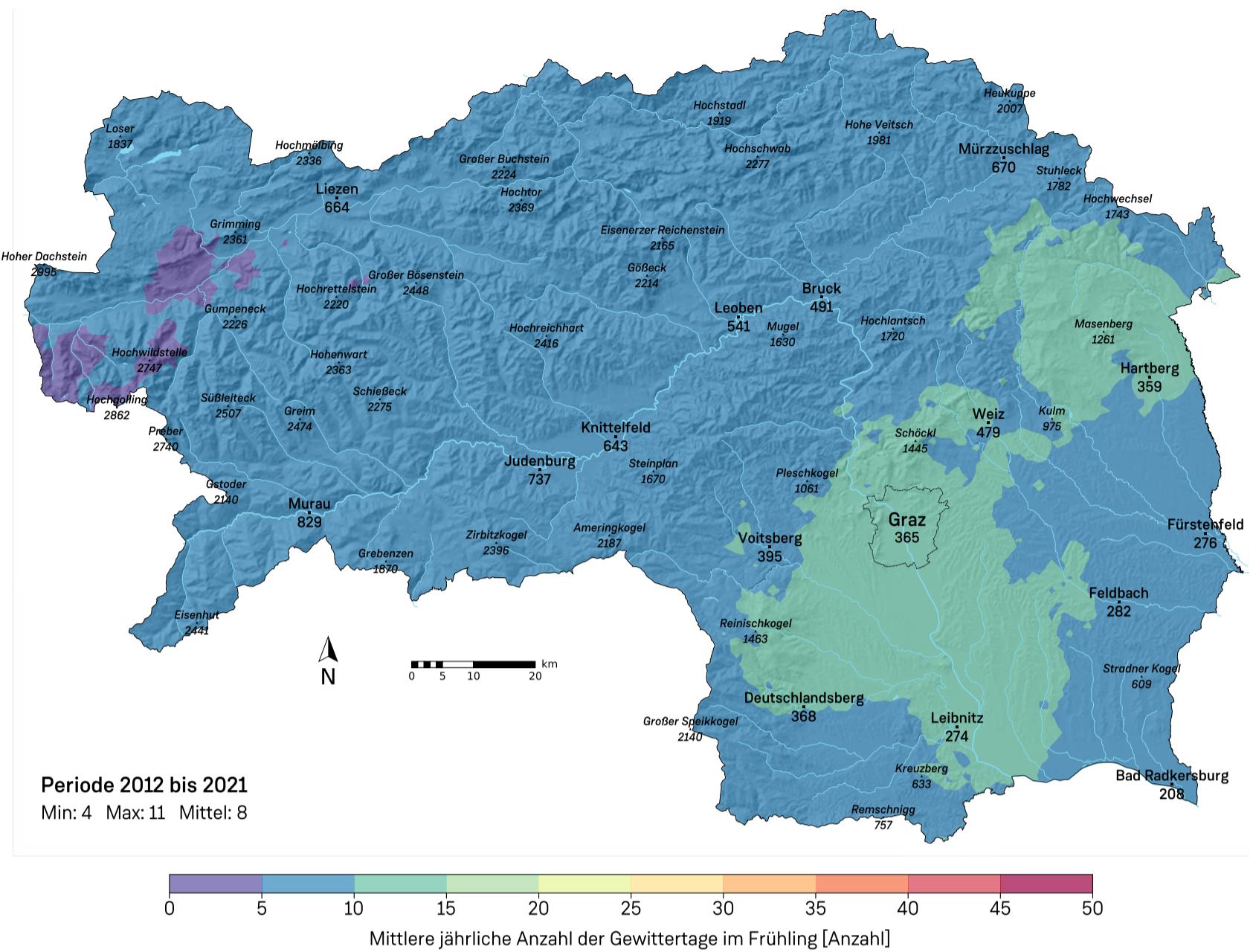


Abbildung 8.3: Mittlere Anzahl der Gewittertage (mit der Annahme einer Hörweite von 15 km) für den meteorologischen Frühling im Zeitraum 2012 – 2021. Datengrundlage: Blitzortungsdaten von ALDIS.

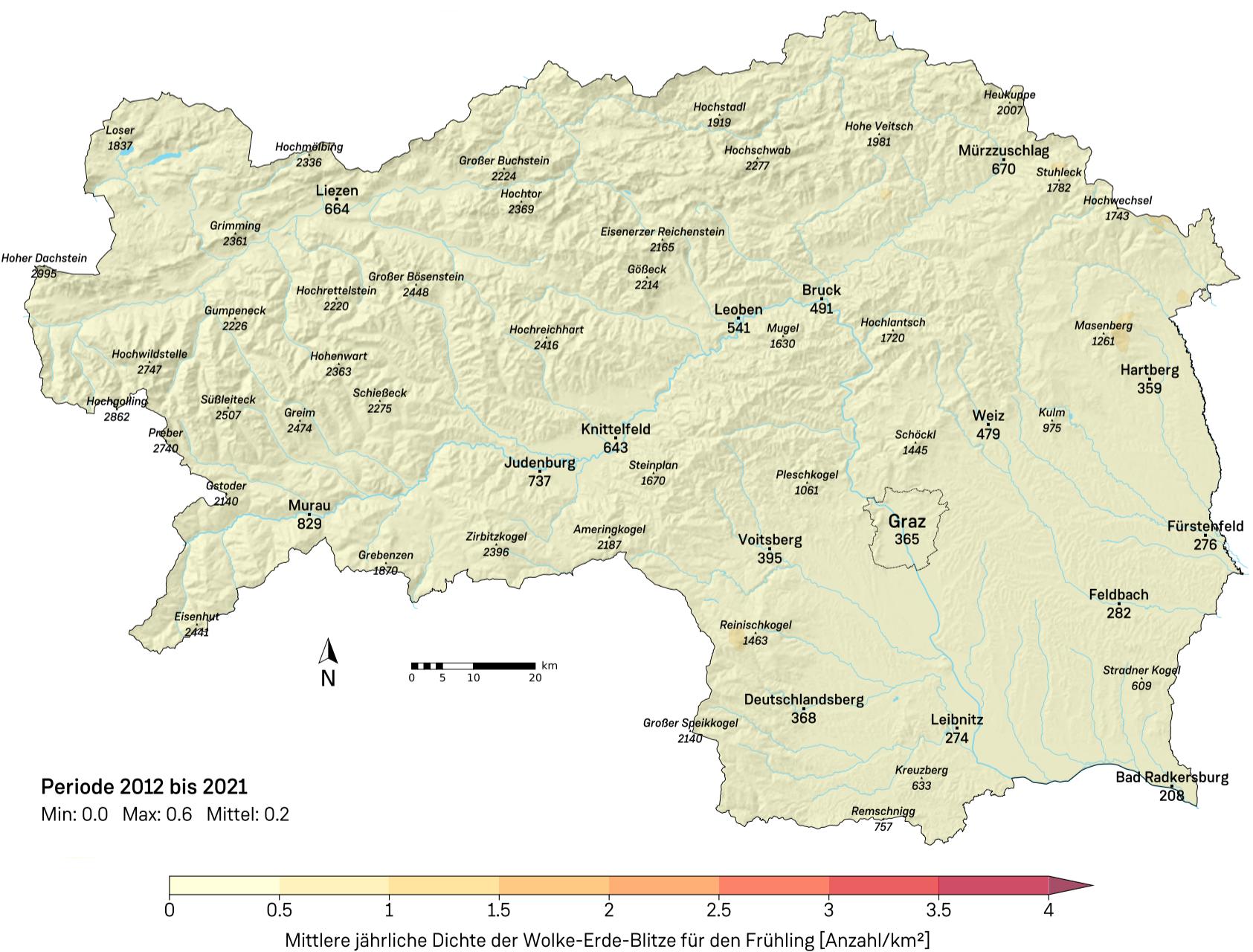


Abbildung 8.4: Mittlere Dichte der Wolke-Erde-Blitze (gemittelt auf 13 km<sup>2</sup> um jeden Punkt) für den meteorologischen Frühling im Zeitraum 2012 – 2021. Datengrundlage: Blitzortungsdaten von ALDIS.

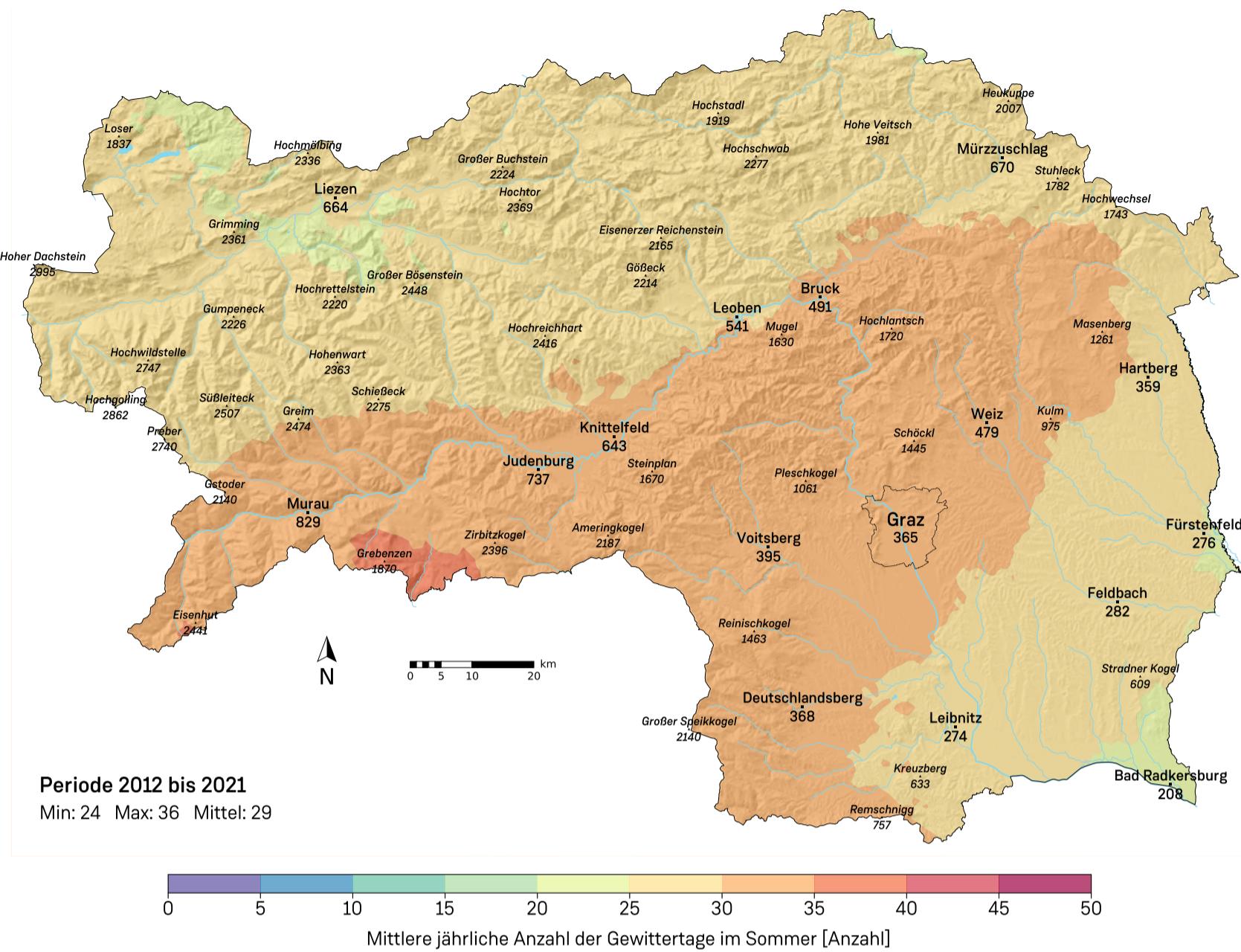


Abbildung 8.5: Mittlere Anzahl der Gewittertage (mit der Annahme einer Hörweite von 15 km) für den meteorologischen Sommer im Zeitraum 2012 – 2021. Datengrundlage: Blitzortungsdaten von ALDIS.

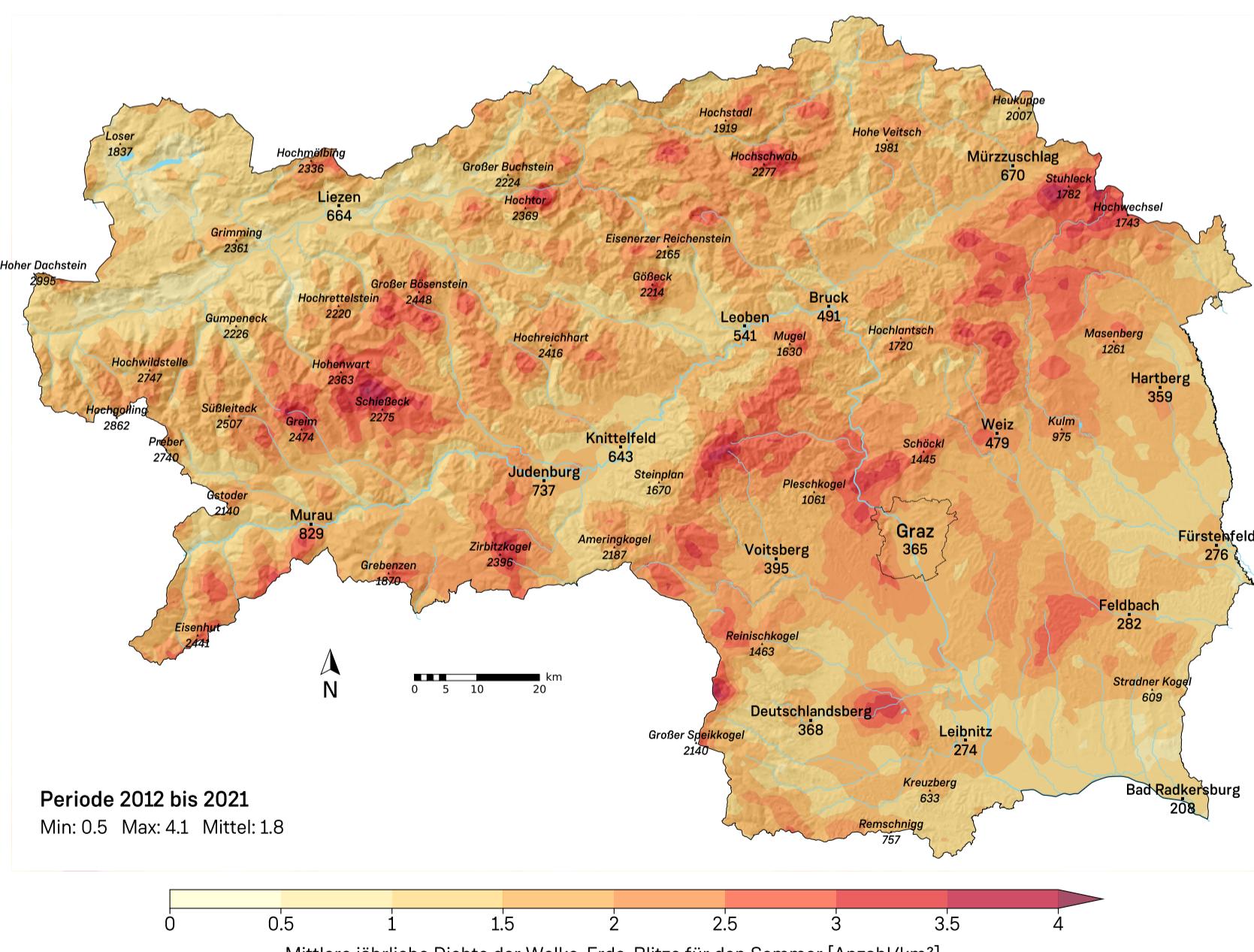


Abbildung 8.6: Mittlere Dichte der Wolke-Erde-Blitze (gemittelt auf 13 km<sup>2</sup> um jeden Punkt) für den meteorologischen Sommer im Zeitraum 2012 – 2021. Datengrundlage: Blitzortungsdaten von ALDIS.

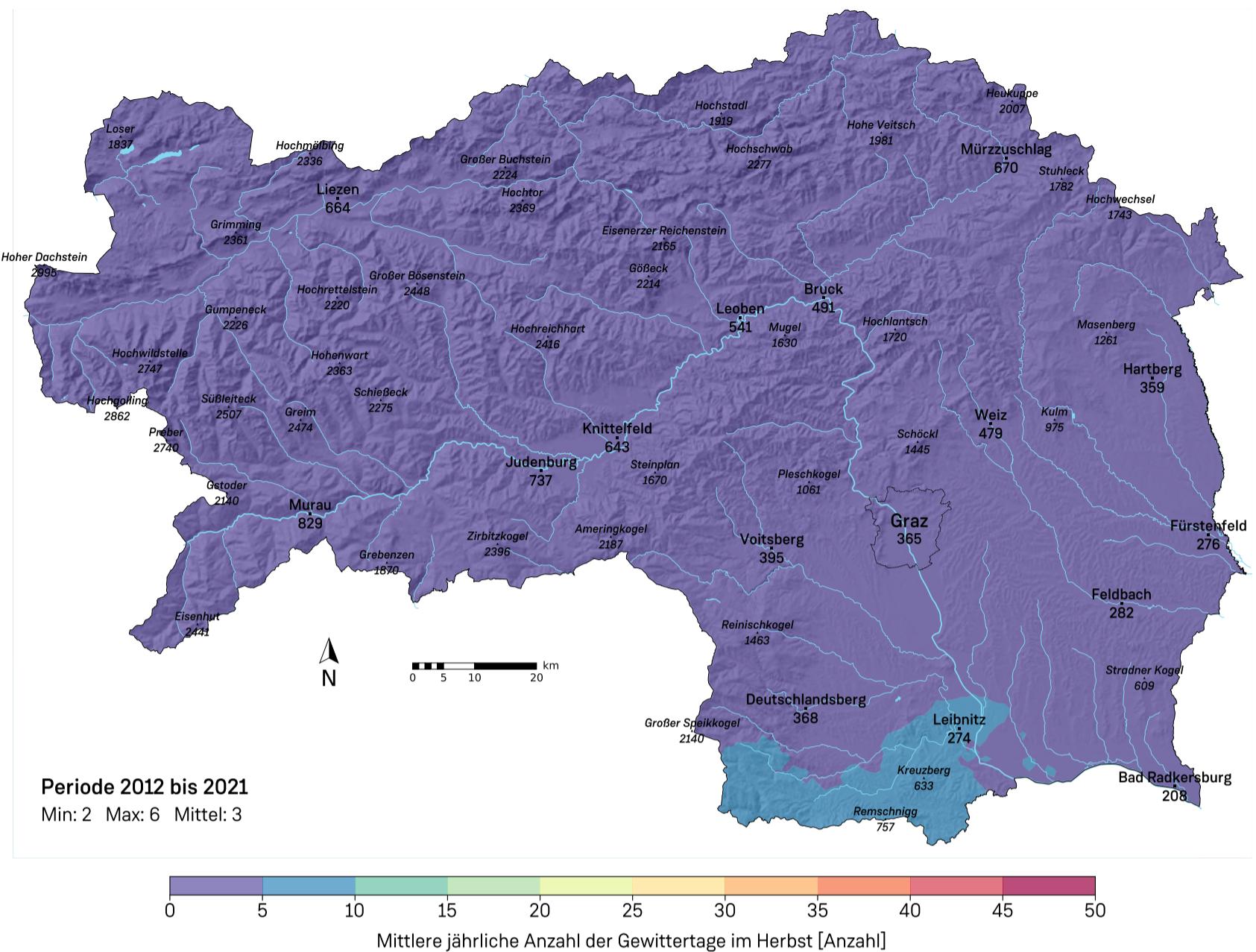


Abbildung 8.7: Mittlere Anzahl der Gewittertage (mit der Annahme einer Hörweite von 15 km) für den meteorologischen Herbst im Zeitraum 2012 – 2021. Datengrundlage: Blitzortungsdaten von ALDIS.

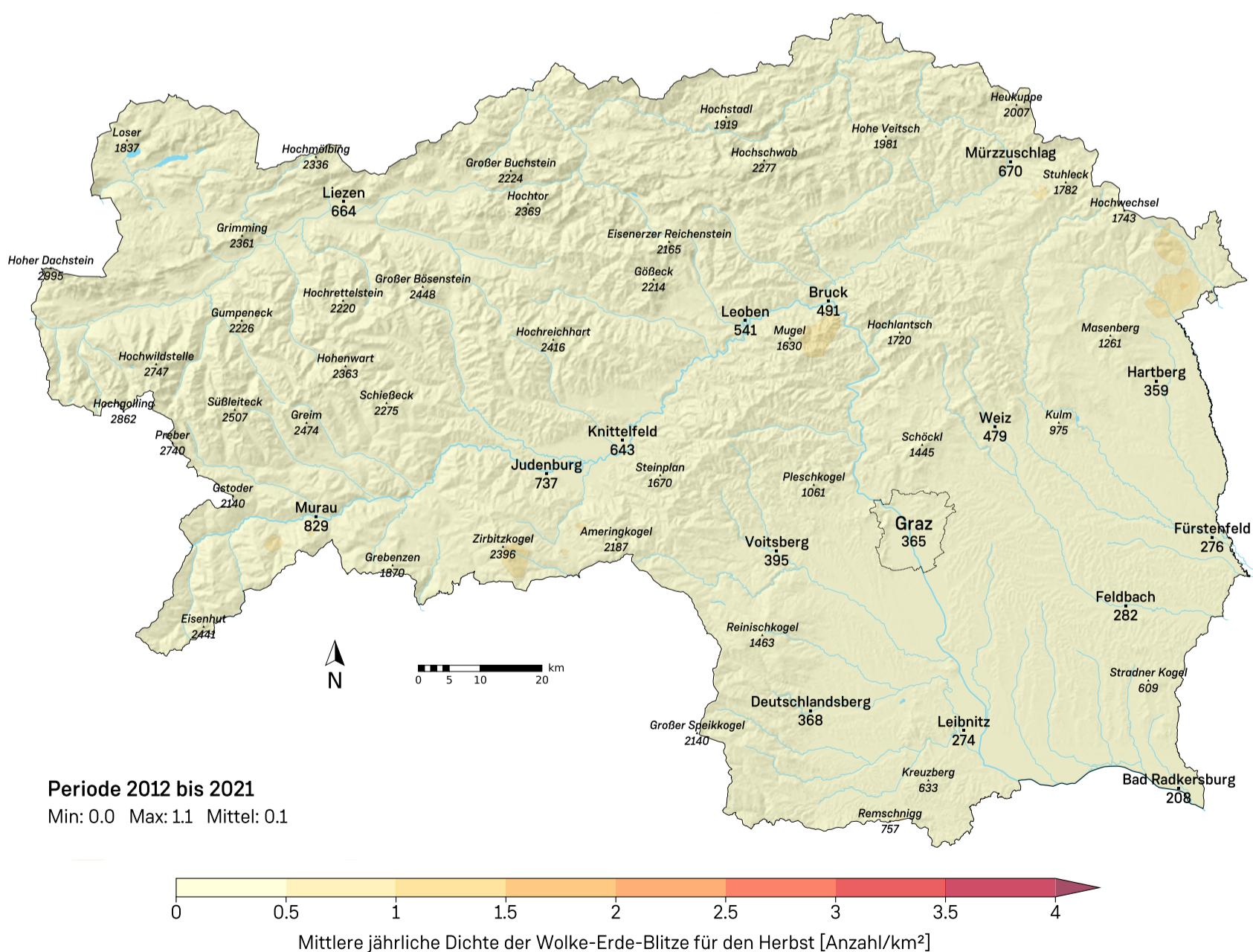


Abbildung 8.8: Mittlere Dichte der Wolke-Erde-Blitze (gemittelt auf 13 km<sup>2</sup> um jeden Punkt) für den meteorologischen Herbst im Zeitraum 2012 – 2021. Datengrundlage: Blitzortungsdaten von ALDIS.

schwächer, auch wenn die thermische Unterstützung auch ihnen immer noch ein ausgeprägtes Sommermaximum verleiht. Im Winterhalbjahr kommt wegen der negativen Energiebilanz am Kontinent die lokale Produktion der „Zutaten“ für Gewitter - Aufheizung und Anfeuchtung von Luftmassen sowie Auslösung durch Tal- und Hangwindsysteme – fast völlig zum Erliegen. Es müssen daher sowohl feuchte, instabil geschichtete

Luftmassen als auch dynamische Auslösungsmechanismen in Form ausgeprägter Kaltfronten vom Atlantik oder vom Mittelmeer „importiert“ werden. Gewittertätigkeit tritt dann nur sporadisch und ausschließlich in Form von Frontgewittern auf, die in der Steiermark allerdings seltener sind als in anderen Teilen Österreichs. Bei einer Anströmung aus dem Nordwestsektor betreffen sie hauptsächlich den Streifen vom Ausseerland bis in den Ma-

riazeller Raum, aus dem Südwestsektor fast nur die grenznahen Gebiete zu Kärnten und Slowenien. Ansonsten bedingt die geographische Lage im Südosten des Alpenraums, dass die Steiermark auf der abgewandten Seite zur Hauptwindrichtung liegt und die dynamische Hebung solcher winterlichen Kaltfronten daher oft durch absinkende Luftbewegungen (Föhneffekte) zunichtegemacht wird.

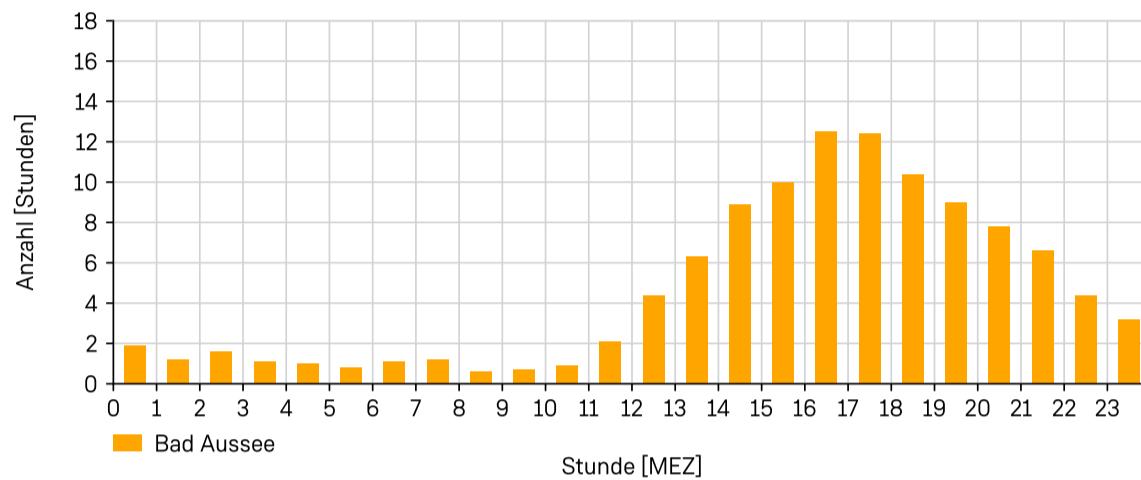


Abbildung 8.9: Anzahl der simulierten jährlichen „Gewitterstunden“ als Funktion der Uhrzeit an der Station Bad Aussee. Datengrundlage: Blitzortungsdaten von ALDIS.

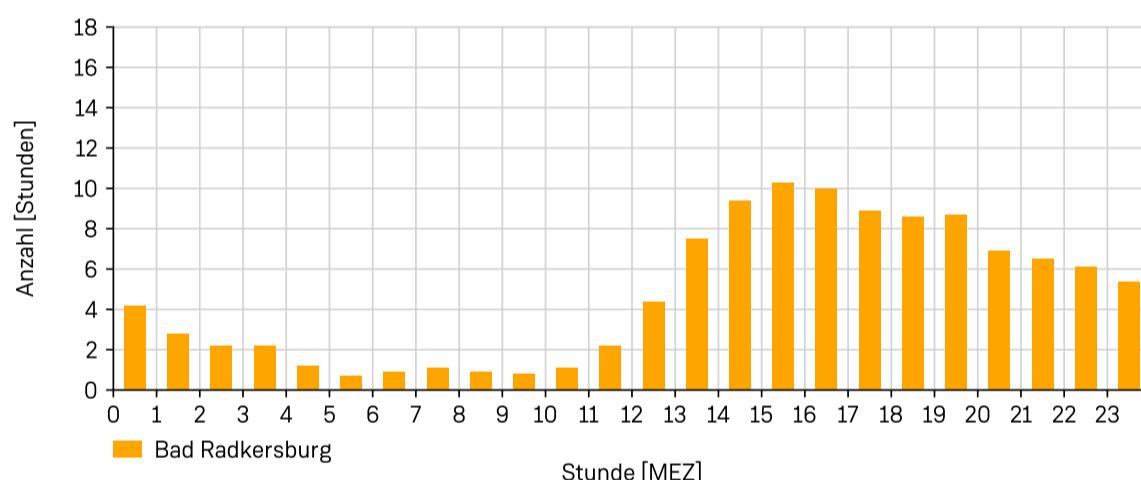


Abbildung 8.10: Anzahl der simulierten jährlichen „Gewitterstunden“ als Funktion der Uhrzeit an der Station Bad Radkersburg. Datengrundlage: Blitzortungsdaten von ALDIS.

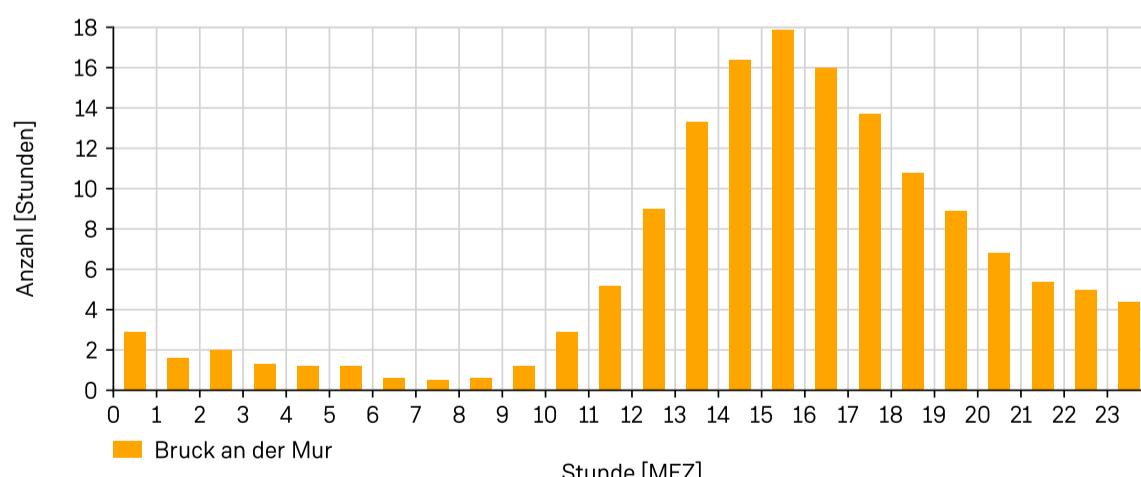


Abbildung 8.11: Anzahl der simulierten jährlichen „Gewitterstunden“ als Funktion der Uhrzeit an der Station Bruck an der Mur. Datengrundlage: Blitzortungsdaten von ALDIS.

### 8.4.3 Tageszeitliche Verteilung

Differenziert man die Gewittertage weiter in Gewitterstunden, dann sind deren mittleren Tagesgänge über die ganze Steiermark verteilt sehr ähnlich (Abbildungen 8.9 – 8.14). Sie weisen einen starken Anstieg ab etwa Mittag, ein Maximum um ca. 16 Uhr (MEZ) und ein allmähliches Abklingen bis etwa Mitternacht

auf. Die räumliche Einheitlichkeit dieses Musters ist insofern etwas überraschend, als sich Gewitter an Tagen, an denen weite Regionen betroffen sind, fast immer zuerst über den Bergen bilden und erst im Verlauf von einigen Stunden auch ins Alpenvorland verlagern. Diese Tage werden aber offenbar durch ausreichend viele andere Tage mit abendlicher Gewittertätigkeit über dem Bergland kompen-

siert, wie sie für Hochdrucklagen typisch sind, oder solche mit früher Gewittertätigkeit in den tiefen Regionen, die bevorzugt bei Tiefdrucklagen auftritt.

Die Tagesgänge, wie auch schon die Jahresgänge, sind für Frontgewitter schwächer als für Luftmassengewitter. Die seltenen winterlichen Frontgewitter weisen sogar überhaupt keinen sichtbaren Tagesgang auf.

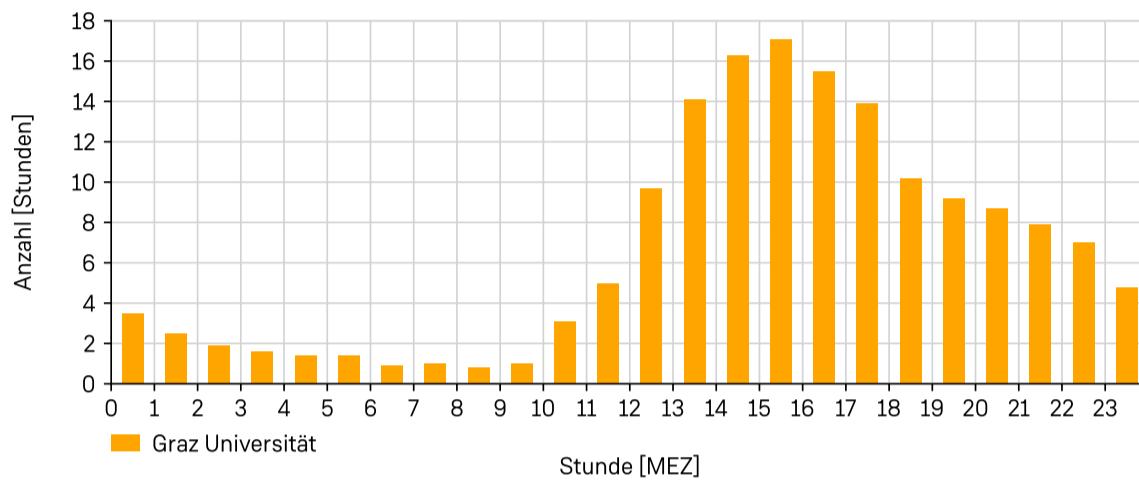


Abbildung 8.12: Anzahl der simulierten jährlichen „Gewitterstunden“ als Funktion der Uhrzeit an der Station Graz Universität. Datengrundlage: Blitzortungsdaten von ALDIS.

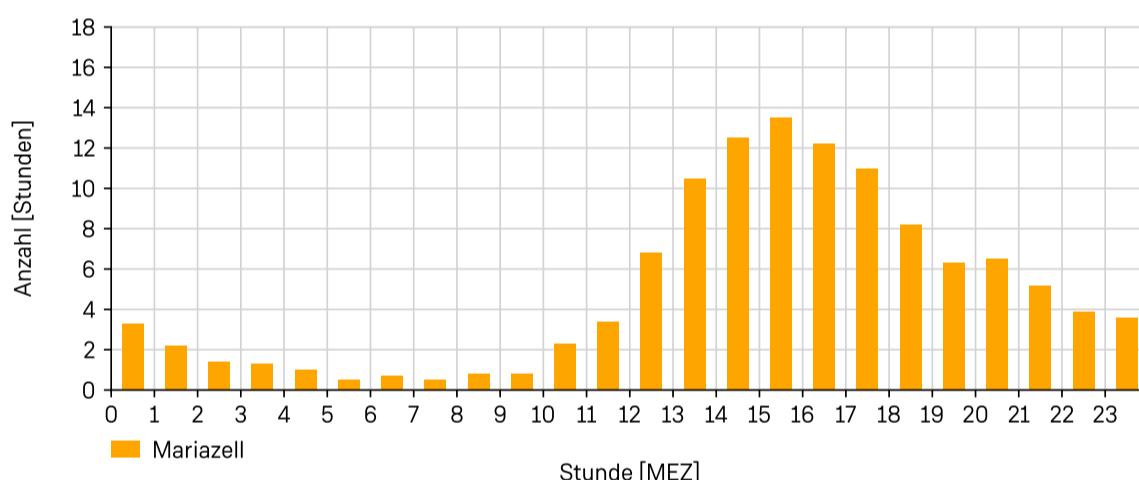


Abbildung 8.13: Anzahl der simulierten jährlichen „Gewitterstunden“ als Funktion der Uhrzeit an der Station Mariazell. Datengrundlage: Blitzortungsdaten von ALDIS.

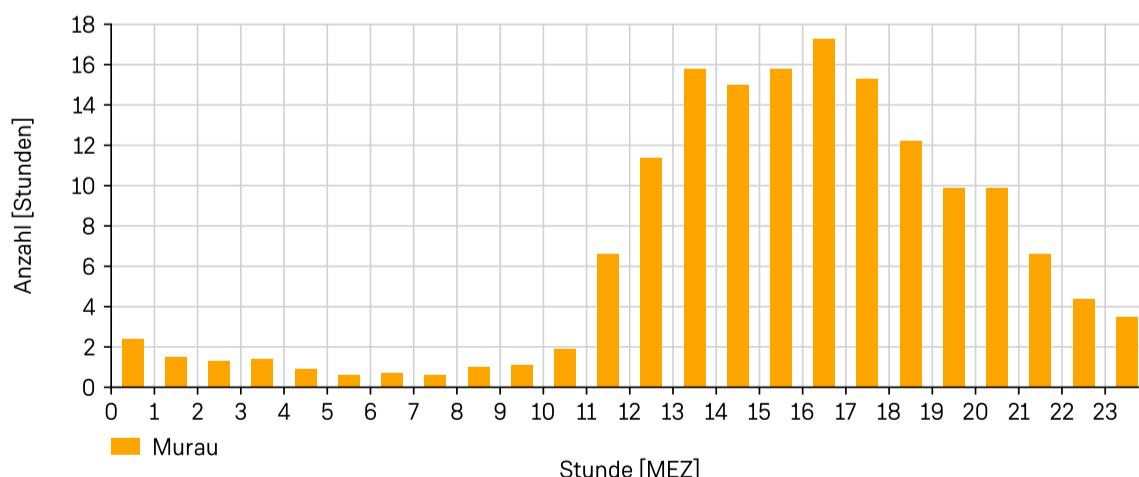


Abbildung 8.14: Anzahl der simulierten jährlichen „Gewitterstunden“ als Funktion der Uhrzeit an der Station Murau. Datengrundlage: Blitzortungsdaten von ALDIS.

# 8.5 Räumliche, saisonale und tageszeitliche Verteilung von Hagel

## 8.5.1 Räumliche Verteilung

Mit Hilfe der aus Radardaten abgeleiteten, kalibrierten Hagelkorngrößen können nun erstmals Hagelhäufigkeiten und maximal aufgetretene Hagelkorngrößen flächendeckend abgeschätzt werden. Wegen der schon erwähnten Unsicherheiten der Methode bedarf es aber sowohl einer fachgerechten Aufbereitung der Daten als auch einer fachgerechten Interpretation der Ergebnisse.

Ausgangsbasis sind die maximalen Korngrößen, die pro Tag gemessen wurden. Da Hagel durch den mitunter sehr starken Wind vertragen werden kann, ein Niederschlagsradar aber nicht bis zum Boden, sondern erst ab einer bestimmten Höhe messen kann, wurde diese Unsicherheit in der Auswertung mittels eines horizontalen Versatzes um 1 km berücksichtigt. Anschließend wurden vereinzelt verbliebene, fehlerhafte Streusignale mit einem Filter bereinigt. Wie am Anfang des Kapitels erwähnt, lässt sich aus den Radardaten zwar die mittlere Hagelkorngröße ableiten, es bleibt aber eine Unsicherheit für den Einzelfall. Um dieser z.B. durch schlechte Einsicht in die Täler bedingten Unsicherheit entgegenzu-

wirken, wurden die Hagelkorngrößen aus Beobachtungen verortet und noch einmal direkt eingebunden. Zur homogeneren Darstellung schließt ein sogenannter Gauß-Filter die Aufbereitung ab.

Die Abbildungen 8.15 – 8.17 illustrieren die aus den Radardaten berechneten mittleren Wiederkehrzeiten von Hagel im Zeitraum 2012 – 2021 mit Korndurchmessern über einem, zwei und vier Zentimetern. Die höchste Gefährdung lässt sich für die Fischbacher Alpen und das Grazer Bergland erkennen, wo an einem fixen Beobachtungsort Hagel von > 1 cm Durchmesser bis zu zweimal jährlich, Hagel von > 2 cm Durchmesser etwa alle ein bis zwei Jahre und Hagel von > 4 cm Durchmesser etwa alle drei bis fünf Jahre zu erwarten ist. Fast genauso häufig tritt Hagel im Großraum Graz und in der Weststeiermark auf. Hingegen ist die Gefährdung sowohl im Bergland der Obersteiermark als auch Richtung Südosten mit zunehmender Entfernung von den Bergen geringer.

Analog zu den mittleren Wiederkehrzeiten zeigt Abbildung 8.18 die größten berechneten Hageldurchmesser im Zeitraum 2012 – 2021. Begrenzte Gebiete mit maximal berechne-

ten Korngrößen von 5 bis 6 cm sind in jedem steirischen Bezirk erkennbar. Trotz der teilweise zufälligen Verteilung, die bei der Untersuchung von seltenen und unregelmäßigen Extremereignissen über einen relativ kurzen Zeitraum unvermeidlich ist, fällt eine Häufung solcher Flächen südlich der Mürz sowie östlich der Pack- und Koralpe, also im Wesentlichen im Grazer Becken und entlang seiner Umrahmung, auf.

Erst bei einem genaueren Vergleich der Hagelparameter aus Abbildung 8.15 – 8.17 und 8.18 mit der Blitzdichte (Abbildung 8.2) lässt sich ein Muster erkennen. Die größte Hagelgefährdung ist oft östlich bis südöstlich zur höchsten Blitzdichte versetzt, und zwar umso mehr, je größere Korndurchmesser man betrachtet. Solche Verschiebungen treten sowohl regional, am auffälligsten vom kärntnerisch-steirischen Grenzgebiet hin zum Steirischen Randgebirge und dem angrenzenden Grazer Becken, als auch lokal auf, am deutlichsten in den Bezirken Murau, Murtal und Leoben von den höchsten Erhebungen der Niederen Tauern und Eisenerzer Alpen hin zu deren Südflanke.

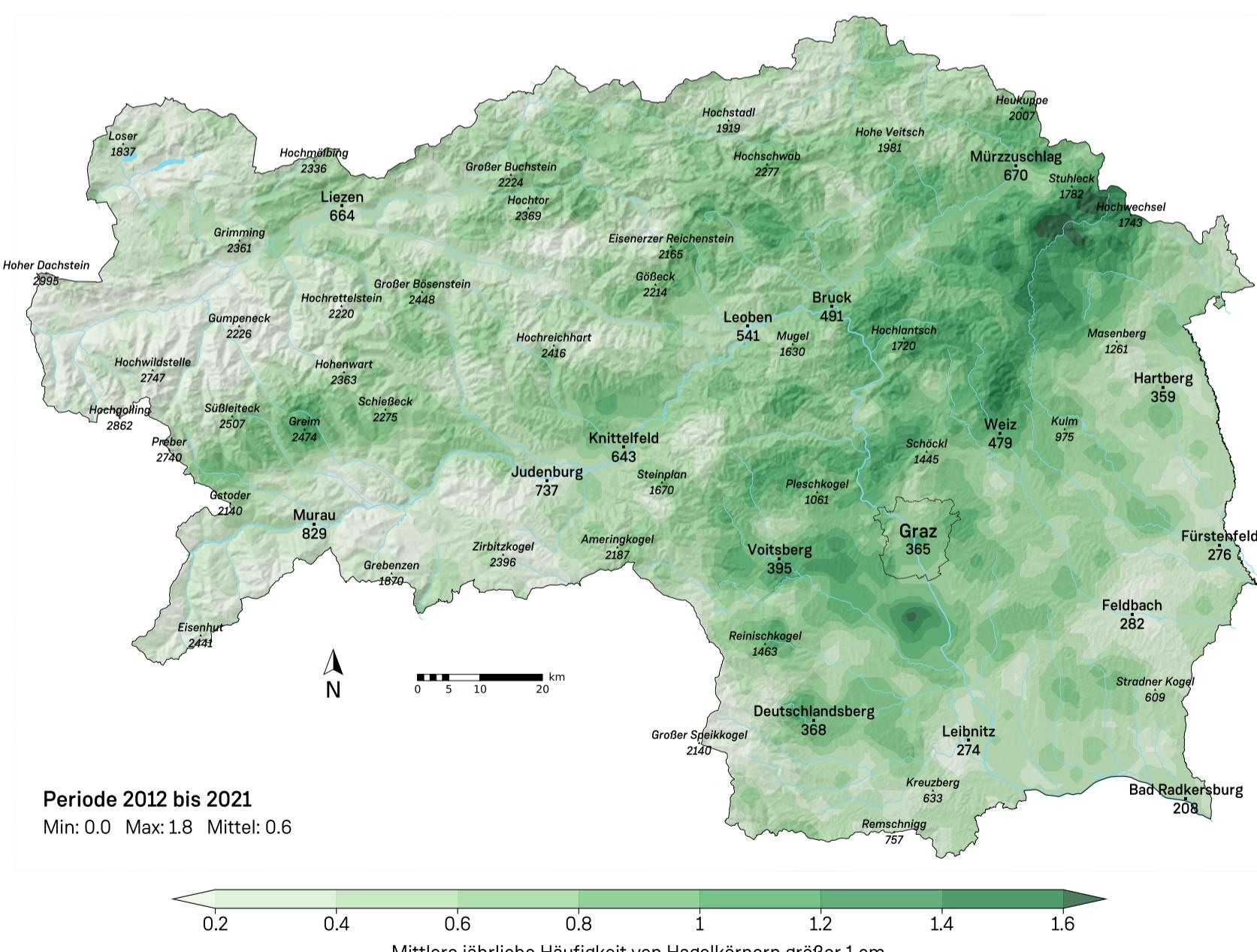


Abbildung 8.15: Berechnete mittlere jährliche Häufigkeit von Hagel > 1 cm Durchmesser im Zeitraum 2012 – 2021 auf einem 1 x 1 km<sup>2</sup>-Gitter. Datengrundlage: Niederschlagsradardaten der Austro Control GmbH, kalibriert mit beobachteten Hagelkorngrößen.

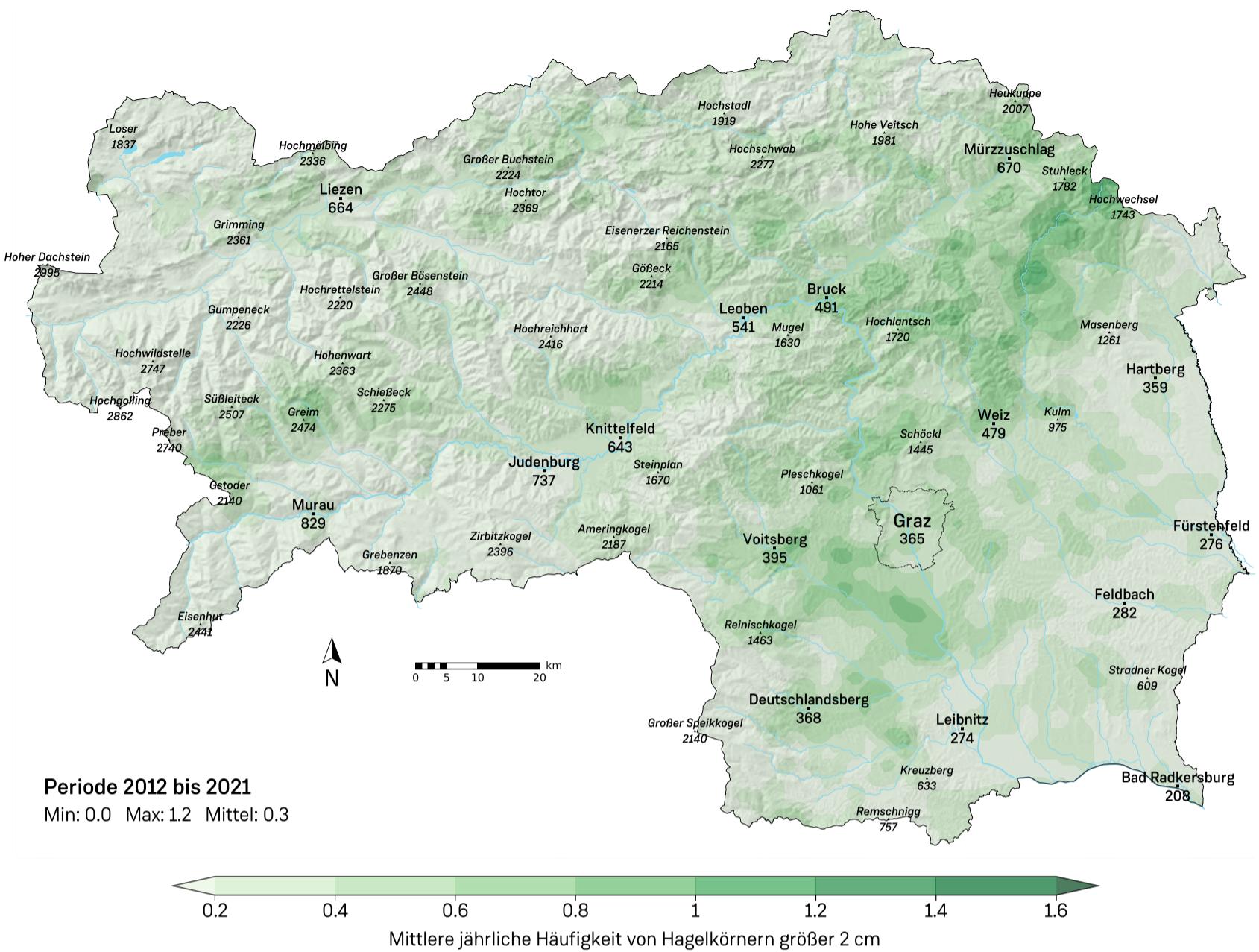


Abbildung 8.16: Berechnete mittlere jährliche Häufigkeit von Hagel > 2 cm Durchmesser im Zeitraum 2012 – 2021 auf einem 1 x 1 km<sup>2</sup>-Gitter. Datengrundlage: Niederschlagsradardaten der Austro Control GmbH, kalibriert mit beobachteten Hagelkorngrößen.

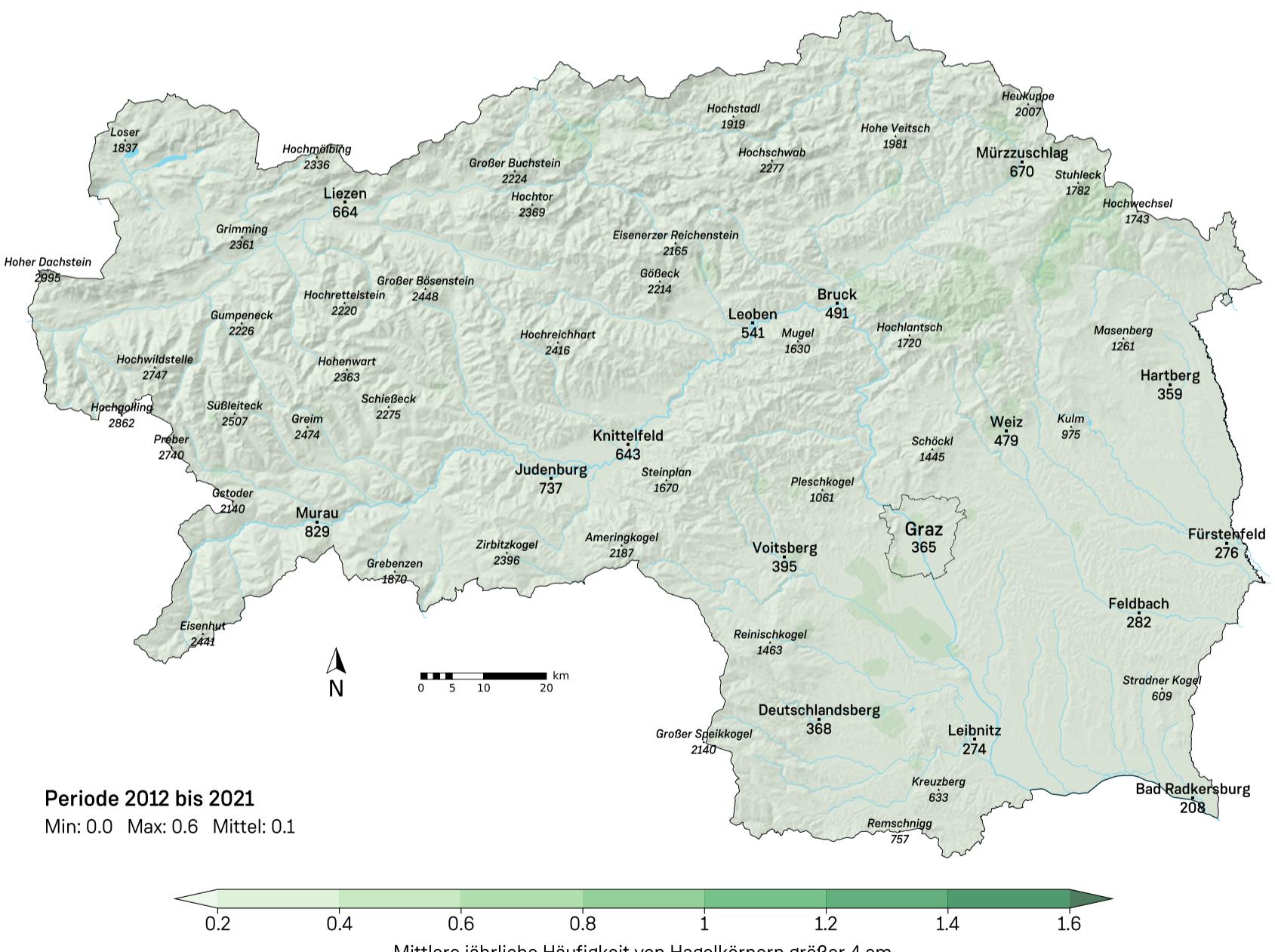


Abbildung 8.17: Berechnete mittlere jährliche Häufigkeit von Hagel > 4 cm Durchmesser im Zeitraum 2012 – 2021 auf einem 1 x 1 km<sup>2</sup>-Gitter. Datengrundlage: Niederschlagsradardaten der Austro Control GmbH, kalibriert mit beobachteten Hagelkorngrößen.

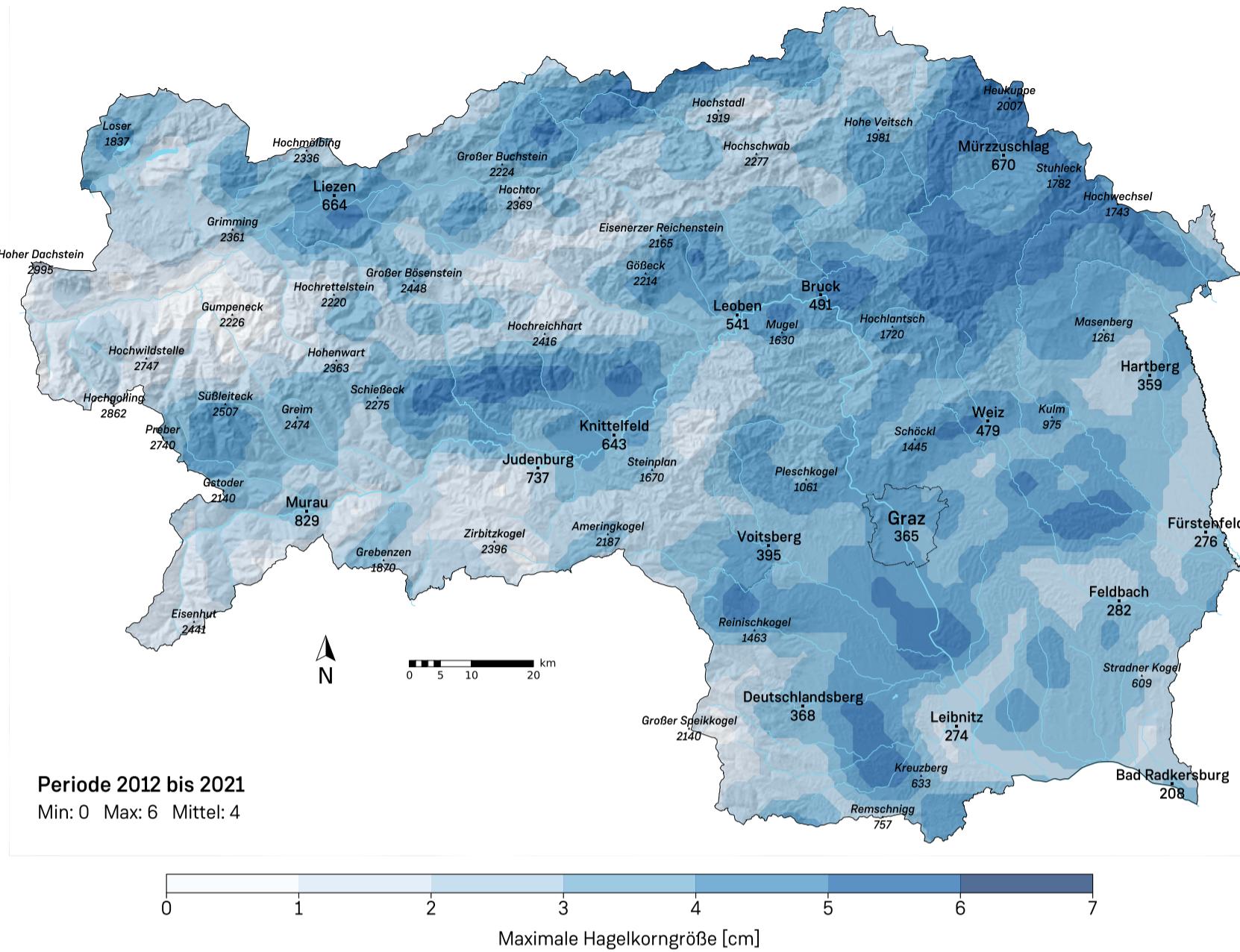


Abbildung 8.18: Berechnete maximale Hagelkorngrößen [cm] im Zeitraum 2012 – 2021 auf einem 1 x 1 km<sup>2</sup>-Gitter. Datengrundlage: Niederschlagsradardaten der Austro Control GmbH, kalibriert mit beobachteten Hagelkorngrößen.

### 8.5.2 Saisonale und tageszeitliche Verteilung

Die Jahres- und Tagesgänge von Hagel entsprechen an sich weitgehend jenen von Gewittern (siehe Kapitel 8.4), sodass hier auf

eigene Abbildungen verzichtet wird. Allenfalls sind die saisonalen und tageszeitlichen Maxima von Hagel noch etwas stärker auf die Monate Mai bis August beziehungsweise auf die Nachmittagsstunden konzentriert, wenn die Luftschichtung am instabilsten ist. Entgegen

einem landläufigen Irrglauben kann es allerdings auch in der Nacht zu (großem) Hagel kommen, auch wenn die Bedingungen dafür dann deutlich seltener zusammenkommen.

## 8.6 Diskussion

Ein charakteristisches Maximum der Gewitter- und Hagelgefahr entlang des Alpenrandes wurde nicht nur in der Steiermark, sondern auch in anderen Bereichen des Alpenraums nachgewiesen. Es ist mit Hilfe der drei notwendigen „Zutaten“ für Gewitterbildungen – instabile Luftschichtung, ausreichend Luftfeuchtigkeit, Hebeungsmechanismen – auch elegant erklärbar.

So heizen sich zwar die hochgelegenen, kargen und trockenen Oberflächen des Alpenbeckens tagsüber rasch auf und erzeugen eine besonders instabile Luftschichtung, stellen allerdings nur wenig Verdunstung bereit. Im Gegensatz dazu reichert eine üppige Verdunstung die bodennahen Luftschichten über den tiefen, feuchten Bereichen des Alpenvorlandes mit Feuchtigkeit an, dies geht aber auf Kosten einer schnelleren Aufheizung. Beide Bedingungen überlappen sich oft in einem etwa 50 – 100 km breiten Gürtel entlang der Al-

penränder, indem sich die bodennahe, feuchte Luftschicht unter die aufgeheizte Luftmasse des Berglandes schiebt. Eine Schlüsselrolle in dieser Zusammenführung, wie auch in der aktiven Auslösung von Gewittern, spielen die Tal- und Hangwindsysteme, die sich an ungestörten Frühlings- und Sommertagen verlässlich ausbilden.

Dieser regelmäßig wiederkehrende Mechanismus stützt ein auch europaweit herausragendes, klimatologisches Gewittermaximum entlang des Steirischen Randgebirges sowie in den grenznahen Bereichen zu Kärnten, wo die Talwindsysteme den bequemsten „Zugriff“ auf die Feuchtigkeit aus dem Vorland beziehungsweise Klagenfurter Becken haben. Weitere Faktoren, die zum Gewitterreichtum der Alpensüdseite im Allgemeinen und der Steiermark im Besonderen beitragen, sind die sonnenseitige Ausrichtung vieler Berghänge, die relative Nähe zur Adria als weiterem großem

Feuchtigkeitsreservoir sowie eine häufig vorkommende Destabilisierung der Luftschichtung von oben, wenn Kaltfronten aus nordwestlichen Richtungen vom Alpenbogen in Bodennähe blockiert werden, ihn aber in der Höhe mit beginnender Abkühlung überstreichen.

Großer Hagel bildet sich fast ausschließlich in organisierten Gewittern, insbesondere Superzellen. Während unorganisierte Luftmassengitter bevorzugt über Bergen auftreten und zwar viele Blitze und heftige Regengüsse, aber nur selten nennenswerten Hagel bringen, organisieren und intensivieren sich Superzellen (die sowohl Luftmassen- als auch Frontgewitter oder Hybride von beiden sein können) typischerweise erst dann, wenn sie sich von den Bergen lösen und in die Talwindsysteme hineinziehen. Diese führen nicht nur besonders feuchte, energiereiche Luft zu, sondern erhöhen dann, wenn sie der Höhenströmung

entgegengerichtet sind, auch systematisch die vertikale Windscherung, die vierte „Zutat“ für organisierte Gewitter. Da die Talwinde in der Steiermark aus südlichen bis östlichen Richtungen wehen, treten die meisten Superzellen hier bei West- und teilweise sogar Nordwestströmungen auf und intensivieren sich in der Mur-Mürz-Furche, ganz besonders aber beim Übertritt ins Grazer Becken. Die Steiermark nimmt hier im Gegensatz zu den meisten anderen Regionen Mitteleuropas eine Sonderstellung ein, da die Bedingungen für organisierte, heftige Gewitter am häufigsten von

Südwestwetterlagen zusammengeführt werden. Das bisher größte bekannte Hagelkorn in der Steiermark wurde am 15. August 2016 in der Gemeinde Leutschach an der Weinstraße (Bezirk Leibnitz) dokumentiert und maß 11 cm im Durchmesser. Wie großer Hagel ist hierzulande überhaupt vorstellbar? Einerseits ist die Steiermark ein sehr ähnlicher Naturraum wie das benachbarte Slowenien, wo erst am 13. Juli 2023 ein neuer nationaler Rekord von bis zu 14 cm großem Hagel in der Gemeinde Krško aufgestellt wurde, andererseits sind auch aus dem an sich weniger gewitter- und

hagelanfälligen nördlichen Alpenvorland von Ober- und Niederösterreich schon drei Fälle von bis zu 12 cm großem Hagel bekannt. Das Potential wurde in der Steiermark zumindest im Zeitraum der uns bekannten Berichterstattung also offenbar noch gar nicht voll ausgeschöpft. Insofern erscheint es nicht nur möglich, sondern sogar sehr wahrscheinlich, dass in den nächsten Jahren oder spätestens wenigen Jahrzehnten auch irgendwo im Vorland einmal ein Nachweis von 12 bis 14 cm großem Hagel erfolgen wird – und das, ohne überhaupt noch den Klimawandel bemühen zu müssen.

## 8.7 Gewitter und Hagel im Klimawandel

Den alles überspannenden Rahmen für das Verhalten von Niederschlägen und Gewittern im Klimawandel bildet die mit der Temperatur steigende Fähigkeit von Luftmassen, Wasserdampf aufzunehmen und bei geeigneten Wetterlagen auch wieder als Niederschlag abzugeben. Bei flächigen Niederschlägen („Landregen“) ist dadurch eine Zunahme der Intensitäten um rund 7% pro Grad Erwärmung zu erwarten. Konvektive Niederschläge (Schauer und Gewitter) dürften, wenn auch mit noch größeren Unsicherheiten, sogar um 10% bis 15% pro Grad Erwärmung intensiver werden. Ihr Verhalten kann nicht mehr nur auf die einfache Schlussrechnung „mehr Wasserdampf hinein = mehr Niederschlag hinaus“ reduziert werden, sondern es muss auch die mit der Menge des Kondensats steigende Freisetzung von latenter Wärme, also des „Treibstoffs“ für Gewitter, berücksichtigt werden. Aufsteigende feuchte Luftblasen erfahren daher in einem wärmeren Klima mehr Auftrieb, Gewitterwolken bilden stärkere Aufwinde aus und werden entsprechend effizienter in der Bildung von Niederschlag. Zwar nimmt das Potential für Gewitter und

Starkniederschläge in einem wärmeren Klima also unzweifelhaft zu, eine Schlüsselfrage ist aber, wie oft dieses Potential auch tatsächlich zu Gewitterbildungen umgesetzt wird. Die bevorzugten Zugbahnen von Tiefdruckgebieten, die die Auslösung von Gewittern begünstigen, sind an den Jetstream, das Westwindband in der oberen Troposphäre, gebunden. In den letzten Jahrzehnten wurde im Zuge des Klimawandels im Mittel eine polwärtige Verschiebung des Jetstreams beobachtet, die auch von einer Abschwächung und von stärkeren Mäandern überlagert wurde. Nach den meisten Klimaprojektionen soll sich dieser Trend im 21. Jahrhundert weiter fortsetzen. Im Sommer verläuft der Jetstream dadurch zunehmend häufiger nördlich an Mitteleuropa vorbei und macht Platz für die Ausdehnung einer mediterran geprägten Witterung auch in die Alpenregion: überwiegend Hochdrucklagen mit langen, sonnigen und trockenen Hitzewellen, die nur noch unregelmäßig von Perioden mit oft intensiven Regenfällen und Gewittern unterbrochen werden, wenn sich doch einmal ein Tiefdruckgebiet vom Jetstream abschnürt und erratische, langsame

Zugbahnen südlich davon einschlägt. Auch einige Sommer der 2010er-Jahre zeigten bereits dieses Muster und können als Vorgeschmack auf unser zukünftiges Klima dienen.

Filtert man die oft starken jährlichen Schwankungen der Gewittertätigkeit durch eine 30-jährige Mittelung heraus, dann nahm die Anzahl der beobachteten Gewittertage in den wenigen langjährigen Aufzeichnungen, die in Österreich verfügbar sind, über das 20. Jahrhundert tendenziell leicht und kontinuierlich zu. An der Station Graz Universität, der längsten Beobachtungsreihe in der Steiermark, stieg sie von anfangs 29 Gewittertagen pro Jahr im Zeitraum 1894 – 1923 bis auf ein Maximum von 42 Gewittertagen pro Jahr im Zeitraum 1974 – 2003. Viele Jahrzehnte lang wiesen die Trends für die Gewittertätigkeit und das Temperaturniveau also parallel aufwärts und zeigten an, dass ein Mangel von atmosphärischen Hebungsprozessen noch kein Thema war.

Seit der Jahrtausendwende zeichnet sich allerdings eine zunehmende Entkoppelung ab: Während sich der Temperaturanstieg weiter beschleunigte, begann die Gewittertätigkeit



Foto 8.2: Starke Aufwinde in einem Gewitter fördern die Bildung von Hagel. Mit zunehmender Verweildauer der Hagelkörner in der Atmosphäre können große Hagschloßen entstehen. Im Bild ein in der Oststeiermark gefallenes Hagelkorn, das durch Anschnellen kleinerer Hagelkörner gewachsen ist. (Foto: F. Hofer)



Foto 8.3: Am 23. Mai 1966 ereignete sich in Graz ein heftiges Unwetter mit Starkregen und nachfolgendem Hagel. Das Bild zeigt die Murgasse, wo sich der Hagel von den umliegenden, steilen Dächern in die relativ enge Gasse ergoss und dort auftürmte. (Foto: Archiv Podesser)

übers Jahr gesehen zu stagnieren und anschließend sogar abzunehmen. Die Anzahl der beobachteten jährlichen Gewittertage an der Universität Graz ging bisher nur leicht auf 39 zurück. Deutlicher fällt ein Rückgang in den seit 1992 verfügbaren Blitzdaten von ALDIS aus, die in den 2000er-Jahren noch besonders viele, hingegen in den 2010er-Jahren besonders wenige Blitzenladungen zeigten. Zwar sind beide Datenquellen wegen möglicher Schwankungen der Beobachtungsqualität beziehungsweise wiederholter technischer Änderungen der Blitzortung nicht homogen, fügen sich allerdings schlüssig in ein Puzzle ein, dessen Muster sich durch eine seltenerne Auslösung von Gewittern mit dem Rückzug der sommerlichen Tiefdrucktätigkeit erklären lässt.

Durch die weitere Verbreitung von ausreichend instabilen, feuchten Luftmassen im Zuge des Klimawandels dehnen sich die Ränder der Gewittersaison in mehreren Dimensionen aus: geographisch gesehen weiter polwärts und auf bisher nur selten von Gewittern betroffene hochalpine Bereiche sowie zeitlich gesehen beginnt die Phase früher und endet später. In der Steiermark werden mit fortschreitendem Klimawandel also auch der April und September immer mehr in die Hauptsaison

für Gewitter sowie der März und Oktober in die Randsaison hineinrutschen. Andererseits ist dafür in den zunehmend trocken-heißen Hochsommermonaten ein Rückgang der Gewittertätigkeit beziehungsweise ein Rückzug auf die Gebirgsregionen zu erwarten. Diese Trends werden derzeit noch von der starken jährlichen Variabilität der Gewittertätigkeit verschleiert, werden aber in Zukunft immer deutlicher hervortreten.

Eine Abschwächung und polwärtige Verschiebung des Jetstreams wurde lange Zeit auch als mögliches Argument dafür gesehen, dass die vertikale Windscherung zurückgehen und die Hagelgefahr daher nicht in gleichem Maß steigen könnte wie die Gewittergefahr an sich. Dies wird allerdings durch neue Erkenntnisse der letzten Jahre zunehmend relativiert und in Frage gestellt.

Der Jetstream ist ein Versuch der Atmosphäre, die Temperaturunterschiede zwischen tropischen und polaren Gebieten auszugleichen. Dieser Temperaturgegensatz schwächt sich in der unteren Troposphäre tatsächlich ab, weil die Polargebiete immer häufiger schneefrei und daher stärker von der Sonneneinstrahlung erwärmt werden, allerdings wird diese Erwärmung wegen der stabilen Luftsichtung nur wenig bis in die obere Tropo-

sphäre weitergegeben. Andererseits führt die Gewittertätigkeit in den Tropen bei weiterer Erwärmung und entsprechend größeren Mengen an kondensierendem Wasser überproportional große Energiemengen vom Boden nach oben ab. In der oberen Troposphäre ist also durch den Klimawandel nicht nur keine Abschwächung, sondern ab einer gewissen Höhe sogar eine weitere Zunahme des Temperaturgegensatzes zu erwarten, der den Jetstream antreibt. Außerdem können Gewitterwolken in einem wärmeren Klima auch größere Höhen erreichen. Es läuft also auf eine Art „Wettrennen“ hinaus: zieht sich der Jetstream schneller polwärts und/oder in größere Höhen zurück, oder stoßen Gewitterwolken schneller dorthin vor?

Diese Frage kann mit unserem aktuellen Wissensstand noch nicht abschließend beantwortet werden. Auch mögliche Verschiebungen bestimmter Wetterlagen, die auf regionaler Ebene die oben beschriebenen groben Trends abschwächen oder weiter verstärken könnten, harren noch einer Klärung. Bis dahin ist jedenfalls die wahrscheinlichste Annahme, dass auch in der Steiermark die Hagelgefahr in einem ähnlichen Ausmaß ansteigen wird wie die Gewittergefahr.

## Literatur

- Allen, J.T., Giannanco, 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, e2019RG000665. <https://doi.org/10.1029/2019RG000665>
- 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, 1429–1440. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0090.1>
- 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, 503. <https://doi.org/10.3390/rs14030503>
- Kaltenböck, R., 2012. New generation of dual polarized weather radars in Austria, in: In Proceedings of the 7th European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology (ERAD). Presented at the 7th European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology (ERAD), Toulouse, France, pp. 24–29.
- Meyer, V., Tüchler, L., Tollardo, M., Cenzon, G., Domenichini, F., 2014. A convection climatology of the inner alpine region based on radar and lightning data 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. *Wea. Forecasting* 13, 286–303. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1998\)013<0286:AEHDAF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1998)013<0286:AEHDAF>2.0.CO;2)