



# **Auswirkungen von Hagelereignissen auf die Landwirtschaft: Eine fernerkundungsbasierte Analyse von Hagelschäden im Kontext des Klimawandels (HAGL)**

 **Bundesministerium**  
Klimaschutz, Umwelt,  
Energie, Mobilität,  
Innovation und Technologie

 **Bundesministerium**  
Bildung, Wissenschaft  
und Forschung



LAND  
OBERÖSTERREICH



umweltbundesamt<sup>®</sup>



Dr. Daniel Hölbling (Projektleitung); Vanessa Streifeneder, MSc.; Dr. Zahra Dabiri

Fachbereich Geoinformatik - Z\_GIS, Paris Lodron Universität Salzburg, Schillerstraße 30, 5020 Salzburg



Diese Publikation sollte folgendermaßen zitiert werden:

Streifeneder, V.; Hölbling, D.; Dabiri, Z. (2023): Auswirkungen von Hagelereignissen auf die Landwirtschaft: Eine fernerkundungsbasierte Analyse von Hagelschäden im Kontext des Klimawandels (HAGL). Endbericht von StartClim2022.E in StartClim2022: Schlüsselmaßnahmen, Messbarkeit und Notfallszenarien, Auftraggeber: BMK, BMWFW, Klima- und Energiefonds, Land Oberösterreich.

Wien, im September 2023

StartClim2022.E

Teilprojekt von StartClim2022

Projektleitung von StartClim:

Universität für Bodenkultur, Department für Wasser – Atmosphäre – Umwelt

Institut für Meteorologie und Klimatologie, Gregor-Mendel-Straße 33, 1190 Wien

[www.startclim.at](http://www.startclim.at)

StartClim2022 wurde aus Mitteln des BMK, BMWFW, Klima- und Energiefonds und dem Land Oberösterreich gefördert.

## Inhaltsverzeichnis

E-1	Kurzfassung.....	8
E-2	Abstract.....	9
E-3	Methoden zur Auswertung von Hagelschäden.....	10
E-4	Datenakquise und Hotspotanalyse .....	14
E-4.1	Untersuchungsgebiet .....	14
E-4.2	Daten.....	14
E-4.3	Hotspotanalyse.....	15
E-5	Auswertung der Hagelschäden in ausgewählten Hotspots .....	22
E-5.1	Workflow - Automatisierung .....	22
E-5.1.1	Trends/Entwicklung der S2-Indices nach Hagelereignissen .....	23
E-5.1.2	Trends/Entwicklung der S1-Indices nach Hagelereignissen .....	23
E-5.1.3	Testen der S1 Kohärenz und deren Eignung.....	24
E-5.2	Beispiele für Hagelschäden.....	25
E-6	Schadenskategorisierung und Schadensindex.....	31
E-7	Validierung .....	33
E-7.1	Visuelle Interpretation .....	33
E-7.2	Feldarbeit.....	33
E-7.2.1	Heterogene Feldstrukturen .....	33
E-7.2.2	Hagelschäden im Mittelalter .....	35
E-7.2.3	Agri-PV Anlage .....	36
E-7.2.4	Interviews mit Landwirtschaft Betreibenden.....	37
E-7.3	Validierung durch Hagelversicherung .....	39
E-8	Dissemination .....	42
E-9	Zusammenfassung und Ausblick .....	44
E-10	Danksagung .....	45
E-11	Literaturverzeichnis .....	46

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abb. E-1:</b> Beispiele für Hagelschäden an verschiedenen Kulturen in der Region Südoststeiermark: a) Salat; b) und c) Ölkürbis; d) und e) Mais; f) Soja. Fotos: © Österreichische Hagelversicherung.....	14
<b>Abb. E-2:</b> Gesamtanzahl der Hagelereignisse von 2016 bis 2022 pro Bezirk in der Steiermark.....	16
<b>Abb. E-3:</b> Summe aller Hagelereignisse pro Bezirk in der Steiermark von 2016 bis 2022 - geographische Lage. ....	16
<b>Abb. E-4:</b> Anzahl der Hagelereignisse pro Jahr/ Monat in der Steiermark.....	17
<b>Abb. E-5:</b> Anzahl der Hagelereignisse nach Monat und Jahr in der Steiermark.....	17
<b>Abb. E-6:</b> Räumliche Verteilung der Hagelereignisse pro Bezirk und Jahr in der Steiermark. ....	18
<b>Abb. E-7:</b> Räumliche Verteilung der Hagelereignisse pro Gemeinde und Jahr von 2016 bis 2020 in der Steiermark. ....	19
<b>Abb. E-8:</b> Top 10 der Gemeinden mit den meisten Hagelereignissen von 2016 bis 2020 in der Steiermark.....	20
<b>Abb. E-9:</b> Kernel-Density Analyse auf Gemeindeebene für die Hagelereignisse von 2016 bis 2022 (Rasterzellengröße: 300 * 300 m). Dunkle Bereiche weisen auf eine verhältnismäßig hohe Anzahl an Hagelereignissen pro Rasterzelle hin, helle Bereiche auf eine niedrige. ....	20
<b>Abb. E-10:</b> Teil-automatisierter Workflow zur Erkennung und Auswertung von Hagelschäden.....	22
<b>Abb. E-11:</b> Beispiel für die Verwendung von in GEE integrierten S1-Daten zur Berechnung von Vegetationsindices.....	23
<b>Abb. E-12:</b> VH-Kohärenz für ausgewählte Felder (Szenario 1: Pre-Event/Pre-Event; Szenario 2: Pre-Event/ Post-Event; Szenario 3: Post-Event/ Post-Event). Hellere Grautöne bedeuten wenig Veränderung, dunklere Töne stärkere Veränderung.....	25
<b>Abb. E-13:</b> S2 Bilder vor (Pre-Event) und nach (Post-Event) einem Hagelereignis am 27.05.2021 für potenziell beschädigte Felder. Im Folgenden sind für diese Felder die berechneten Indices als Zeitreihen dargestellt. Für eine bessere Zuordnung der Felder wurden diese bei gleichen Anbauarten nummeriert.....	26
<b>Abb. E-14:</b> Zeitreihe der Mittelwerte der optischen Pflanzengesundheits- und Wassergehaltsindices von potenziell beschädigten Feldern durch ein Hagelereignis am 27.05.2021. ....	27
<b>Abb. E-15:</b> Zeitreihe der Standardabweichungswerte der optischen Pflanzengesundheits- und Wassergehaltsindices von potenziell beschädigten Feldern durch ein Hagelereignis am 27.05.2021.....	28
<b>Abb. E-16:</b> Zeitreihe der Mittelwerte (links) und der Standardabweichungswerte (rechts) der Pflanzengesundheits- und Wassergehaltindices eines nicht beschädigten Wintergerstenfeldes. ....	29
<b>Abb. E-17:</b> S1 Bilder von potenziell beschädigten Feldern vor und nach einem Hagelereignis am 27.5.2021, dargestellt in Falschfarben. Rot: VV; Grün: VH; Blau: VH/VV Verhältnis. Das Pre-Event Bild ist vom 23.05.2021 und das Post-Event Bild vom 28.05.2021.....	29
<b>Abb. E-18:</b> Zeitreihenanalyse der von S1 abgeleiteten Vegetationsindices (Mittelwert). Die rote Linie zeigt das Hagelereignis am 27.05 2021.....	30
<b>Abb. E-19:</b> Beispiele von Feldern (in schwarz) und dem Anteil der beschädigten Flächen detektiert mit OBIA auf Basis von PlanetScope (links; in gelb) und S2 (rechts, in red). Das Schadensereignis fand am 27.05.2021 statt. Die helleren Strukturen in den Feldern weisen auf Beschädigungen hin. Die unterschiedlich gezackten Linien resultieren von der unterschiedlichen räumlichen Auflösung der Sensoren (PlanetScope: 3 m; S2: 10 m).....	31
<b>Abb. E-20:</b> Beispiel für ein Wintergerstenfeld in dem nur mit PlanetScope (links) beschädigte Flächen (in gelb; ca. 20% des Feldes beschädigt) festgestellt werden konnten.....	32
<b>Abb. E-21:</b> Besuchte Gemeindegebiete während der Feldarbeit.....	33
<b>Abb. E-22:</b> Windwurfschäden in Getreidefeldern bei Riegersburg, Zwaring-Dobl und Wollsdorferegg.....	34
<b>Abb. E-23:</b> Heterogene Strukturen in Ölkürbisfeldern und einem Maisfeld (unten links). ....	34

<b>Abb. E-24:</b> Riegersburg mit Weinanbau aus der Burg (rechts), Ausstellung zu Hexen und historischen Hagelschäden (Mitte und links) .....	35
<b>Abb. E-25:</b> Besuch der Agri-PV Versuchsanlage bei Haidegg.....	37
<b>Abb. E-26:</b> Leichter Hagelschaden bei einem jungen Apfel.....	38
<b>Abb. E-27:</b> Apfelbauernhof Kobler - Hagelnetze mit Stahlkonstruktion.....	39
<b>Abb. E-28:</b> Beschädigung des Hagelnetzes und Aufbau bei Apfelbauer Darnhofer; Hagelnetz mit Holzkonstruktion. ....	39
<b>Abb. E-29:</b> Zeitlicher Verlauf der Feldmittelwerte der S2 Pflanzengesundheit- und Wasserindices von Feldern mit Hagelschäden, welche durch die Hagelversicherung validiert wurden (oben Hagelereignis am 25.7; unten Hagelereignis am 30.6).....	40
<b>Abb. E-30:</b> Zeitlicher Verlauf der Standardabweichung im Feld der S2 Pflanzengesundheits- und Wasserindices von Feldern mit Hagelschäden, welche durch die Hagelversicherung validiert wurden (oben Hagelereignis am 25.7 (Anmerkung: andere Achsendarstellung!); unten Hagelereignis am 30.6). ....	40
<b>Abb. E-31:</b> HAGL Projektlogo.....	43

## Tabellenverzeichnis

<b>Tab. E-1:</b> Indikatoren für die Pflanzengesundheit basierend auf Sentinel-2 .....	11
<b>Tab. E-2:</b> Indikatoren für den Wassergehalt basierend auf Sentinel-2 .....	12
<b>Tab. E-3:</b> Indikatoren für Phänologie und Biomasse basierend auf Sentinel-1 .....	12
<b>Tab. E-4:</b> Hotspots und Hotspotevents.....	21

## E-1 Kurzfassung

Hagelschäden in der Landwirtschaft sorgen jährlich für Millionenschäden in Österreich. Die meisten Hagelschäden gibt es in der Südoststeiermark, eines der hagelreichsten Gebiete Europas, welches durch landwirtschaftliche Flächen und den Obstanbau geprägt ist. In Hinblick auf die zu erwartende Zunahme von schweren Hagelereignissen durch den Klimawandel ist die Entwicklung von robusten, effizienten und kostengünstigen Methoden für die Detektion von Hagelschäden in der Landwirtschaft umso relevanter. Die Auswertung von frei verfügbaren Fernerkundungsdaten, d. h. Zeitreihen von Sentinel-Satellitenbildern des europäischen Weltraumprogramms, erlaubt eine erste Einschätzung des Schadens. Die Ergebnisse können Sachverständigen von Versicherungen vor Ort als Orientierung dienen und die Schadensanalyse nach Extremereignissen beschleunigen und vereinfachen, insbesondere bei großen landwirtschaftlichen Flächen.

Im Projekt HAGL haben wir eine fortschrittliche Methode zur effizienten Ermittlung von Hagelschäden in der Landwirtschaft durch die Kombination von optischen (Sentinel-2) und Radar-Satellitendaten (Sentinel-1) entwickelt und in Österreich getestet und angewandt. Die Ergebnisse umfassen eine Trendanalyse von Hagelereignissen sowie Karten zu besonders von Hagelereignissen betroffenen Gebieten in der Südoststeiermark. Die Satellitenbilddauswertungen verdeutlichen, wie sich die Vegetation auf den landwirtschaftlichen Flächen während der Vegetationsperiode verändert, und liefern Rückschlüsse auf potenzielle Hagelschäden.

Die automatisierte Methode zur Ermittlung von Hagelschäden in der Landwirtschaft durch die Kombination von frei verfügbaren Satellitendaten ist auf andere Regionen übertragbar und kann dabei helfen besonders betroffene landwirtschaftliche Gebiete zu ermitteln, potenzielle Anpassungsmaßnahmen zu treffen und die Versicherungsarbeit im Falle eines Hagelschadens effizienter zu gestalten.

## E-2 Abstract

Hail damage to agriculture causes millions of damages in Austria every year. Most hail damage occurs in the region of south-eastern Styria, one of the areas in Europe with the highest number of hailstorms, which is characterized by agricultural areas and fruit growing. Given the expected increase in severe hail events due to climate change, developing robust, efficient, and cost-effective methods for detecting hail damage in agriculture is highly relevant. The application of freely available high temporal and spatial resolution remote sensing data, such as the Sentinel missions of the European Space Programme, allows an initial assessment of the damage. The results can serve as an orientation for insurance experts on-site and accelerate and simplify damage analysis after extreme events, especially for large agricultural areas.

In the HAGL (“Impact of hail events on agriculture: A remote sensing-based analysis of hail damage in the context of climate change”) project, we developed an advanced method for efficiently determining hail damage in agriculture by combining optical (Sentinel-2) and radar satellite data (Sentinel-1) and tested and applied it in Austria. The results include a trend analysis of hail events, as well as maps of areas particularly affected by hail events in south-eastern Styria. The satellite image time series analyses illustrate how agricultural crops change during the growing season and can be used to indicate potential hail damage.

The automated method for determining hail damage in agriculture by combining freely available optical and radar satellite data can be transferred to other regions, and can help identify affected agricultural areas, take potential adaptation measures, and make insurance work more efficient in the event of hail damage.

## E-3 Methoden zur Auswertung von Hagelschäden

Der Schaden verursacht durch Hagelereignissen in der Landwirtschaft in Österreich betrug von Juni 2021 bis Juli 2021 ca. 105 Mio. €. Die Österreichische Hagelversicherung betitelte dies als neuen Rekord (Österreichische Hagelversicherung VVaG, 2023). Mohr & Kunz (2013) analysierten die Hagelschäden in Zentraleuropa über die letzten Jahrzehnte und stellten eine stetige Zunahme fest. Durch den Klimawandel werden die Extremwetterereignisse in Zukunft nicht nur weiter zunehmen, sondern sich auch verstärken (Laviola et al., 2022; Rädler et al., 2019). Rädler et al. (2019) ermittelten, dass es durch eine Zunahme von instabilen Wetterlagen besonders zu vermehrten Hagelereignisse mit großen Hagelkörnern (Durchmesser >5 cm) kommen wird. Dies wird auch zu mehr landwirtschaftlichen Schäden führen (Rädler et al., 2019). Um eine Entschädigung für die entstandenen Hagelschäden in der Landwirtschaft zu erhalten, können Landwirtschaft Betreibende ihre Felder versichern. In Österreich geschieht dies über die Hagelversicherung. Nach einem Hagelereignis wird der Schaden durch eine Feldinspektion durch Versicherungsvertreter:innen ermittelt. Dies kann bei einer großen Anzahl an betroffenen Feldern sehr zeitaufwendig werden und auch fehlerbehaftet sein (Furlanetto et al., 2023; Longo et al., 2022).

Mit der alternativen Erfassung von Hagelschäden durch Fernerkundungsdaten (Satellitenbilder, Luftbilder und Drohnen) befassten sich bereits einige Studien, unter anderem Furlanetto et al. (2023), Ha et al. (2022) und Sosa et al. (2021). Die Untersuchungsgebiete befinden sich jedoch meistens in den USA und Kanada, wo im Gegensatz zu Österreich die Felder um ein Vielfaches größer sind. In den vergangenen Jahren wurden Hagelschäden auf Basis einer Veränderungsanalyse, kombiniert mit einer Zeitreihenauswertung von Landsat-Daten, detektiert (Ha et al., 2022). Ha et al. (2022) gingen noch einen Schritt weiter und versuchten mit höher aufgelösten Fernerkundungsdaten und mit Hilfe des normalisierten differenzierten Vegetationsindices (NDVI) sowie dessen Veränderungen den Schaden nicht nur zu lokalisieren, sondern auch zu quantifizieren. Jedoch beschränkten sie sich dabei auf nur ein Hagelereignis und eine limitierte Anzahl an Feldern.

Sosa et al. (2021) analysierten Hagelschäden auf Feldern in Südamerika mithilfe von Algorithmen des maschinellen Lernens. Dabei verwendeten sie Sentinel-1 (S1) und Sentinel-2 (S2) Satellitenbilder sowie eine Auswahl an verschiedenen Vegetationsindices. Ihr Ziel war es homogene Schadenszonen in den Feldern zu detektieren. Für eine Verbesserung des Algorithmus schlugen sie eine Adaption der Indices basierend auf der Feldfrucht und der Phänologie, sowie das Einbinden von Informationen zum Bodentyp vor.

Longo et al. (2022) entwickelten eine Plattform zur Ermittlung des Wachstums und des Ernteertrages von Maisfeldern nach einem Hagelereignis. Dabei verwendeten sie ein Ertragsmodell mit Fernerkundungsdaten und speziell den Blattflächenindex (LAI) für zukünftige Prognosen. Sie erreichten dabei eine hohe Übereinstimmung zwischen Model und Wirklichkeit, konnten Ernterückstände und den Ernteindex (dient zur Ermittlung des Erntezeitpunktes) jedoch nicht vollständig modellieren. Furlanetto et al. (2023) verwendeten in ihrer Studie zum Blattverlust von Mais nach einem Hagelschaden ebenfalls den LAI, ermittelt aus dem NDVI, welcher mit S2 und Drohnenbildern bestimmt wurde. Auch hier wurde der Schaden erfolgreich ermittelt, besonders durch die Verwendung von hochaufgelösten Drohnenbildern. Die Verwendung von Drohnen ist jedoch für großräumige Analysen nicht rentabel. Beide Methoden wurden allerdings nur für Mais getestet.

Für die Ermittlung von Hagelschäden mit Satellitendaten können neben Indices von optischen Daten (z. B. S2) auch Indices von Radardaten (z. B. S1) verwendet werden. Bell et al. (2020) kombinierten beispielsweise S1 und MODIS (räumliche Auflösung zw. 250 m und 1 km) Satellitendaten, um Schäden von Hagelzügen zu analysieren. Für eine Schadensanalyse auf Feldebene empfehlen sie jedoch höher aufgelöste Daten wie Landsat 8 (Auflösung: 30 \* 30 m), S2 (Auflösung: 10 \* 10 m) oder kommerzielle Satelliten. Auch betont diese Studie, dass weitere Analysen der S1 Daten im Zusammenhang mit Hagelschäden notwendig sind, um ein besseres Verständnis von der Rückstreuungscharakteristik der Radardaten zu bekommen.

S1 ist ein Synthetic Aperture Radar (SAR) Sensor und zählt zu den aktiven Sensoren. Die Radarrückstreuung hängt von der Oberflächenrauigkeit und der elektrischen Leitfähigkeit der Materialien (dielektische Koeffizienten) ab. Sie wird direkt von der Vegetation (Art, Dichte, etc.) und dem Boden beeinflusst (Sosa et al., 2021). Mehrere Autor:innen haben vorgeschlagen, aus Radardaten abgeleitete Indices zu verwenden, um biophysikalische Pflanzenparameter und die Biomasse abzuschätzen (Kim et al., 2012; Periasamy, 2018). SAR-Sensoren haben den Vorteil im Gegensatz zu optischen Daten wetter- und tageszeitenunabhängig Daten aufnehmen zu können und bieten somit eine einmalige Gelegenheit in Gebieten mit hoher Wolkenbedeckung dichte Zeitreihen zu erhalten. Besonders relevant wird dies auch nach Extremwetterereignissen, da eine zeitnahe Aufnahme der betroffenen Gebiete wichtig ist. Die berechneten Indices von optischen und Radardaten können somit Auskunft über die Pflanzengesundheit, den Wassergehalt der Blätter und des Bodens und der Biophysik geben, um Rückschlüsse auf potenzielle Schäden der Vegetation zu ziehen. In Tab. E-1 bis Tab. E-3 sind die in der Literatur verwendeten Indices aufgelistet, welche auch in unserem Projekt verwendet wurden. Es gibt jedoch wenige Studien, die eine kombinierte Auswertung von verschiedenen Indices abgeleitet aus optischen und Radardaten versuchten und kleinstrukturierte landwirtschaftliche Flächen mit unterschiedlichen Kulturen untersuchten.

**Tab. E-1:** Indikatoren für die Pflanzengesundheit basierend auf Sentinel-2 (Furlanetto et al., 2023; Ha et al., 2022; Sosa et al., 2021)

Index Pflanzengesundheit	Formel	Beschreibung
Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	$\frac{NIR - RED}{NIR + RED}$	Indikator zur Photosynthese
Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI)	$\frac{NIR - GREEN}{NIR + GREEN}$	Indikator zur Photosynthese: <ul style="list-style-type: none"> <li>Zur Erkennung von welkenden und alternden Pflanzen</li> <li>Zum Messen des Nitrogengehaltes der Blätter, wenn es keinen auffälligen roten Kanal im Satellitenbild gibt</li> </ul>
Modified Soil-Adjusted Vegetation Index (MSAVI2)	$\frac{((2xNIR + 1 - \sqrt{(2xNIR + 1)^2 - 8x(NIR - RED)})/2}$	Indikator für Pflanzendichte und Pflanzengesundheit zu Beginn der Phänologie
Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI)	$\frac{NIR - RED}{NIR + RED + L} + (1 + L)$ L=0.5	Bodenbereinigter NDVI: <ul style="list-style-type: none"> <li>Zu Beginn der Phänologie in ariden Regionen mit wenig Vegetation (unter 15%) und einer offenen Erdoberfläche</li> </ul>
Plant Senescence Radiation Index (PSRI)	$\frac{RED - GREEN}{REDEGE}$	Indikator für den Alterungsprozess von Blättern und Setzlingen: <ul style="list-style-type: none"> <li>Verringerung der Chlorophyllabsorption nach einem Hagelereignis</li> </ul>
Enhanced Vegetation Index (EVI)	$2.5x\left(\frac{NIR - RED}{NIR + (6xRED - 7.5xBLUE) + 1}\right)$	Indikator für Blätterdachfläche und -dichte: <ul style="list-style-type: none"> <li>In Regionen mit einer großen Menge an Chlorophyll (z. B. Regenwald) und keinen</li> </ul>

		großen topographischen Einflüssen (keine Bergregionen)
Advanced Vegetation Index (AVI)	$(NIR * (1 - RED) * (NIR - RED)) * 1/3$	Indikator für Veränderung der Pflanzengesundheit
Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI)	$\frac{NIR - (2RED - BLUE)}{NIR + (2RED - BLUE)}$	Indikator für Veränderung der Pflanzengesundheit – atmosphärenkorrigiert: <ul style="list-style-type: none"> <li>Für Regionen mit einem hohen Anteil an Aerosolen in der Atmosphäre (z. B. Regen. Nebel, Dunst, Rauch, Abgase)</li> </ul>
Leaf Area Index (LAI)	$3.618 \times EVI - 0.118$	Indikator für die Blattfläche
Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index (MCARI)	$((NIR - RED) - 0.2 \times (NIR - GREEN)) \times \frac{NIR}{RED}$	Indikator für Chlorophyllgehalt: <ul style="list-style-type: none"> <li>Wird zusammen mit LAI und AVI interpretiert</li> </ul>

**Tab. E-2:** Indikatoren für den Wassergehalt basierend auf Sentinel-2 (Furlanetto et al., 2023; Ha et al., 2022; Sosa et al., 2021)

Index - Wassergehalt	Formel	Beschreibung
Moisture Stress Index (MSI)	$\frac{SWIR}{NIR}$	Indikator für Wassergehalt der Blätter
Normalized Difference Water Index (NDWI)	$\frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$	Indikator für Wassergehalt in Pflanzen und Erde

**Tab. E-3:** Indikatoren für Phänologie und Biomasse basierend auf Sentinel-1 (Angearu et al., 2022; Bhogapurapu et al., 2021; Kim & Zyl, 2009; Sosa et al., 2021)

Index - Phänologie/ Biomasse	Formel	Beschreibung
Dual-Pol Diagonal Distance (DPDD)	$\frac{\sigma_{vh(i)} - \sigma_{vv(i)}}{\sqrt{2}}$	Indikator für Biomasse
Vertical Dual Depolarization Index (VDDPI)	$\frac{(\sigma_{vh(i)} - \sigma_{vv(i)})}{\sigma_{vv(i)}}$	Quantifizierung von Biomasse
Radar Vegetation Index (RVI)	$\frac{4 * \sigma_{vh(i)}}{\sigma_{vv(i)} + \sigma_{vh(i)}}$	Indikator für phänologische Stadien
Radar Vegetation Index für Sentinel-1 (RVI4S1)	$\left( \sqrt{1 - (\sigma_{vv(i)} / (\sigma_{vh(i)} + \sigma_{vv(i)}))} \right) * \left( 4 * \left( \frac{\sigma_{vh(i)}}{\sigma_{vh(i)} + \sigma_{vv(i)}} \right) \right)$	Indikator für Biomasse
Microwave Polarization Difference Index (MPDI)	$\frac{(\sigma_{vv(i)} - \sigma_{vh(i)})}{(\sigma_{vv(i)} + \sigma_{vh(i)})}$	Quantifizierung von Biomasse
Backscatter ratio (VH/VV)	$\frac{\sigma_{vh(i)}}{\sigma_{vv(i)}}$	Indikator für phänologische Stadien

Vertical Dual Depolarization Index (VDDPI)	$\frac{(\sigma_{vh(i)} - \sigma_{vv(i)})}{\sigma_{vv(i)}}$	Quantifizierung von Biomasse
--	--	------------------------------

## E-4 Datenakquise und Hotspotanalyse

### E-4.1 Untersuchungsgebiet

Als Untersuchungsgebiet diente die Region Südoststeiermark, eines der hagelreichsten Gebiete Europas, welches durch landwirtschaftliche Flächen und den Obstanbau geprägt ist. Das Gebiet ist durch meist kleinstrukturierte landwirtschaftliche Flächen gekennzeichnet, wobei verschiedenste Kulturen, oft auch nah nebeneinander, gedeihen. Begünstigt durch den fruchtbaren Boden, die naturräumlichen Gegebenheiten und das milde Klima gedeihen unter anderem verschiedene Getreidearten, Obst, Gemüse und Wein. Bekannt ist die Region beispielsweise für den Anbau von Ölkürbissen oder Äpfeln und vieler weiterer regionaler Besonderheiten (Holunderplantagen, Schilcher Wein, Käferbohnen, etc.), sowie für ihre einzigartige Kultur- und Naturlandschaft.

Die Landwirtschaft in der Steiermark ist jedoch stark betroffen vom Klimawandel, wobei die sich die regionalen Auswirkungen stark unterscheiden (Gössinger-Wieser et al., 2017). Extremwetterereignisse (Starkniederschläge, Hagel, Dürren, Kälte-/Wärmephasen, etc.) werden in manchen Regionen weiter zunehmen und vermehrt zu Problemen führen, wobei oft durchwachsene Ernten das Resultat sind. Zum Beispiel gibt es im Jahr 2023 kaum Kirschen und Marillen wegen eines späten Frostes im Frühling (persönliche Kommunikation mit Landwirtschaft Betreibenden in der Region, Juni 2023). Abb. E-1 zeigt einige Beispiele für Hagelschäden an verschiedenen Kulturen in der Region Südoststeiermark. Zusätzlich können Ertragsausfälle auch durch das mit dem Klimawandel verbundene Aufkommen von neuen Schädlingen und Krankheiten auftreten (Gössinger-Wieser et al., 2017).



**Abb. E-1:** Beispiele für Hagelschäden an verschiedenen Kulturen in der Region Südoststeiermark: a) Salat; b) und c) Ölkürbis; d) und e) Mais; f) Soja. Fotos: © Österreichische Hagelversicherung.

### E-4.2 Daten

Für das Ermitteln von Trends und das Auswählen von Hagel-Hotspots in der Südoststeiermark wurden verschieden Datenquellen verwendet:

European Weather Database (ESWD (<https://www.eswd.eu/>): Hier werden Informationen zu verschiedenen Wetter- und Unwetterereignissen, basierend auf Messdaten, Beobachtungen und Zeitungsberichten in Europa gesammelt und veröffentlicht. Jedes der Ereignisse besitzt neben einer Qualitätsstufe auch Koordinatenangaben. Für unser Projekt haben wir für einen Teil unseres Untersuchungsgebietes Daten zur Verfügung gestellt bekommen (Dotzek et al., 2009), weitere Daten haben wir manuell aus dem Archiv übernommen. Dabei wurden nur Ereignisse verwendet, die entweder durch qualifizierte Beobachter oder Zeitungsartikel bestätigt wurden.

Geosphere Austria (früher: ZAMG) - Stationsdaten: Die kostenlos zur Verfügung gestellten Stationsdaten geben Aufschluss über die Anzahl der Hagelereignisse pro Monat, die an der jeweiligen Station gemessen wurden.

Geosphere Austria - Unwetterchronik: Die Unwetterchroniken werden in dem Webservice VIOLA zur Verfügung gestellt und vereinheitlichen die Datensammlung von Geosphere Austria. Hier werden nach Bezirken und Gemeinden Hagelereignisse gelistet, zusammen mit Informationen zum Schaden. Diese Informationen stammen von Geosphere Austria selbst, dem European Severe Storms Laboratory (ESSL), dem European Meteorological Network (EUMETNET) und aus Zeitungsartikeln.

Pressemitteilungen der österreichischen Hagelversicherung: Die Hagelversicherung veröffentlicht auf ihrer Webseite nach Extremwetterereignissen (z. B. Unwetter, Dürren) Pressemitteilungen mit Angaben zum Schadensausmaß, Schadenskosten und den betroffenen Gebieten. Dies können entweder einzelne Gemeinden sein oder ganze Bezirke.

Die ermittelten Daten wurden tabellarisch zusammengetragen und auf redundante Meldungen überprüft. Angaben ohne Koordinaten wurden den entsprechenden Gemeinden oder Bezirken zugeordnet.

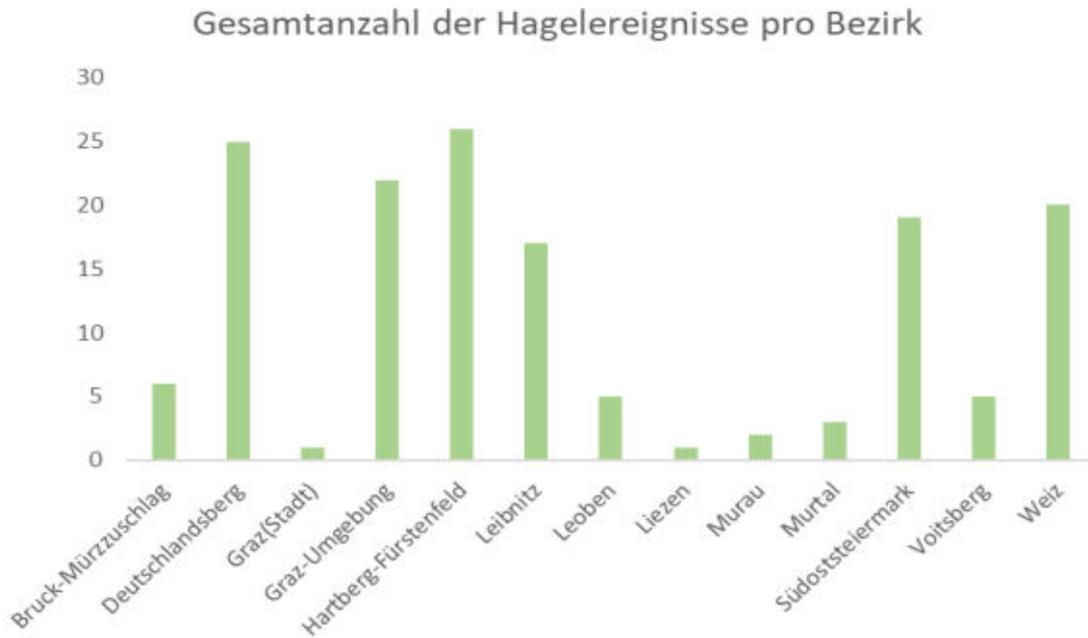
Für die optischen und Radardaten wurden frei verfügbare Sentinel-1 (S1) und Sentinel-2 (S2) Satellitenbilder des Europäischen Erdbeobachtungsprogramm Copernicus der Europäischen Union (EU) mit einer räumlichen Auflösung von 10 m und einer maximalen zeitlichen Auflösung von 5-6 Tagen verwendet. Zum Vergleich und zur optischen Validierung wurden PlanetScope Daten (3 m Auflösung; zeitliche Auflösung: 1 Tag), welche für Forschungszwecke frei verfügbar sind (ein entsprechender Antrag wurde genehmigt), verwendet.

Der frei verfügbare INVEKOS (Integriertes Verwaltungs- und Kontrollsystem) Datensatz aus den Jahren 2016 bis 2022 wurde zur Ermittlung der Feldgrenzen und der Anbauart verwendet.

### **E-4.3 Hotspotanalyse**

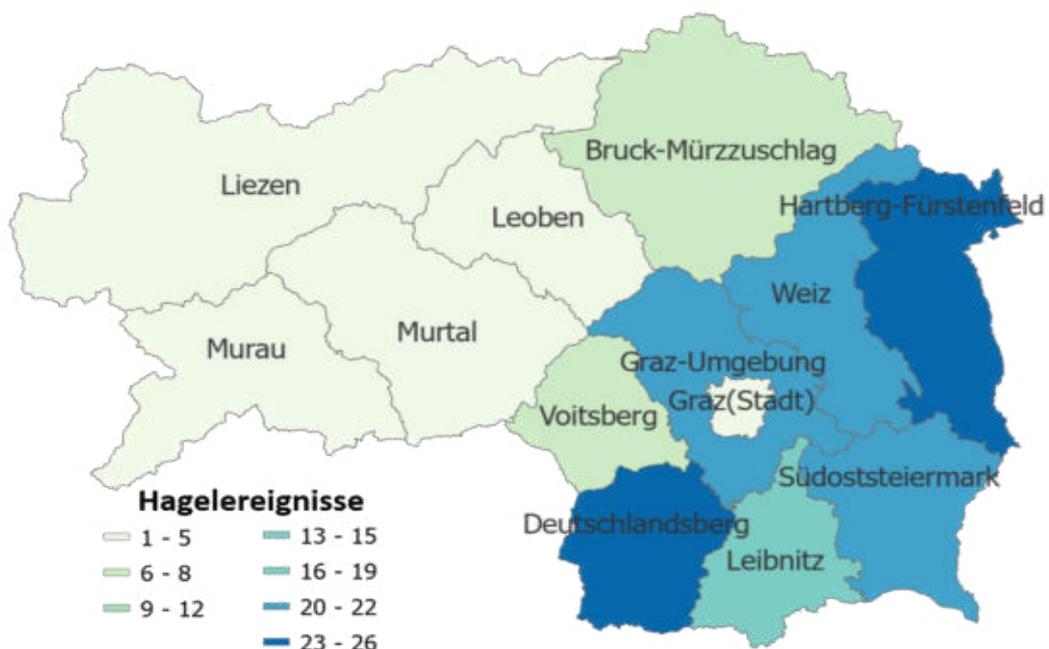
Für die Hagelanalyse wurden zuerst Hagelereignisse, die nur auf Gemeindeebene genannt wurden, in Punktdaten umgewandelt (dies gilt nicht für die Daten der ESWD, da diese bereits als Punktdaten vorlagen). Hierfür wurde der Mittelpunkt des jeweiligen Gemeindepolygons gewählt. Um die Hotspots zu ermitteln, wurden zwei Methoden verwendet:

Kernel-Density: Auf Gemeindeebene wurde mit Hilfe der erstellten Punktdaten eine Kernel-Density Analyse durchgeführt. Hierbei wird ein Raster erstellt, das die Anzahl der Hagelereignisse innerhalb einer Rasterzelle beinhaltet. Dafür wird über jedes Hagelereignis ein sogenannter Kernel, eine gekrümmte Oberfläche ähnlich einem Kegel, platziert. Der höchste Punkt dieser Kerneloberfläche besitzt zugleich auch den höchsten Wert. Dieser wird niedriger je weiter man sich vom Hagelereignis entfernt. Für die Anzahl der Hagelereignisse in einer Rasterzelle werden alle Werte der einzelnen Kerneloberflächen addiert. Summe der Hagelereignisse pro Gemeinde/ Bezirk: Hierbei werden alle Hagelereignisse, die sich zwischen 2016 und 2022 in einer Gemeinde oder einem Bezirk ereignet haben, aufsummiert, um die Gemeinden/Bezirke mit der höchsten Anzahl an Hagelereignissen im gesamten Untersuchungszeitraum zu ermitteln, aber auch pro Jahr für die Trendanalyse.



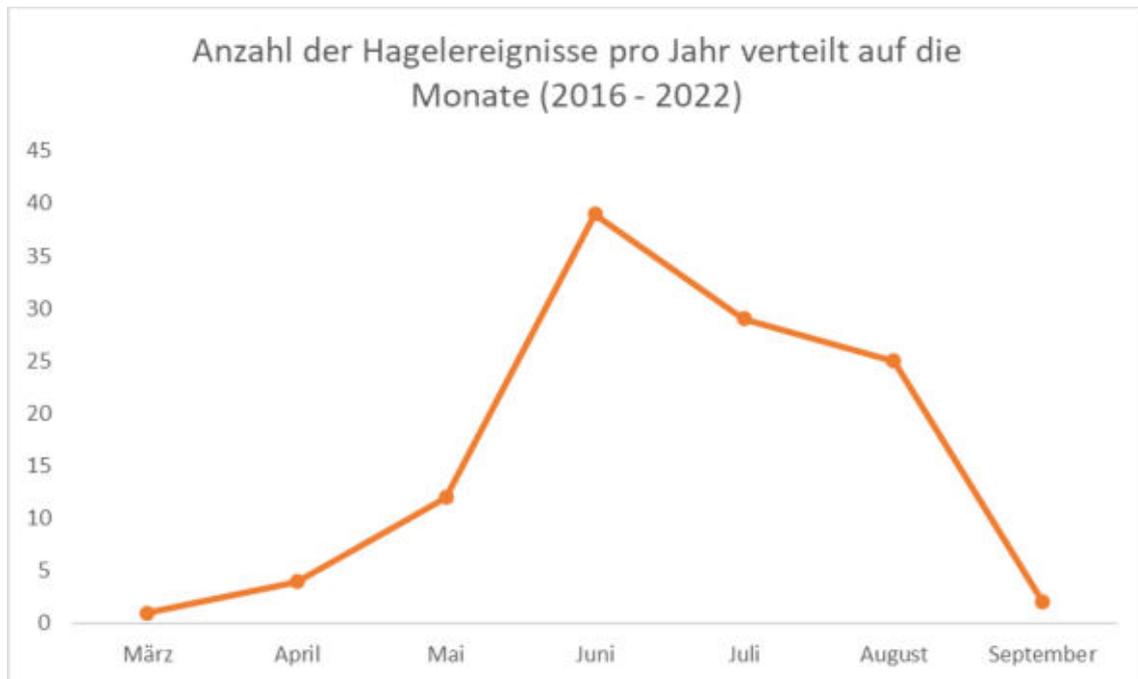
**Abb. E-2:** Gesamtanzahl der Hagelereignisse von 2016 bis 2022 pro Bezirk in der Steiermark.

Betrachtet man die gesamte Anzahl der Hagelereignisse pro Bezirk (Abb. E-2), so fallen fünf Bezirke besonders ins Auge: Deutschlandsberg (25), Hartberg-Fürstenfeld (26), Graz-Umgebung (22), Südoststeiermark (19) und Weiz (20). Der Mangel an Meldungen für Graz-Stadt hat die Ursache, dass diese Daten auf Gemeindeebene ausgewertet wurden. Betrachtet man Abb. E-3 erkennt man ein deutlich höheres Aufkommen von Hagelereignissen im südöstlichen Bereich der Steiermark. Vergleicht man diese Abbildung mit der Hagelgefährdungskarte Österreichs (<https://www.hora.gv.at/>), bereitgestellt von Geosphere Austria, die allerdings mit Hageldaten von 1971-2011 erstellt worden ist, erkennt man ein ähnliches Bild.

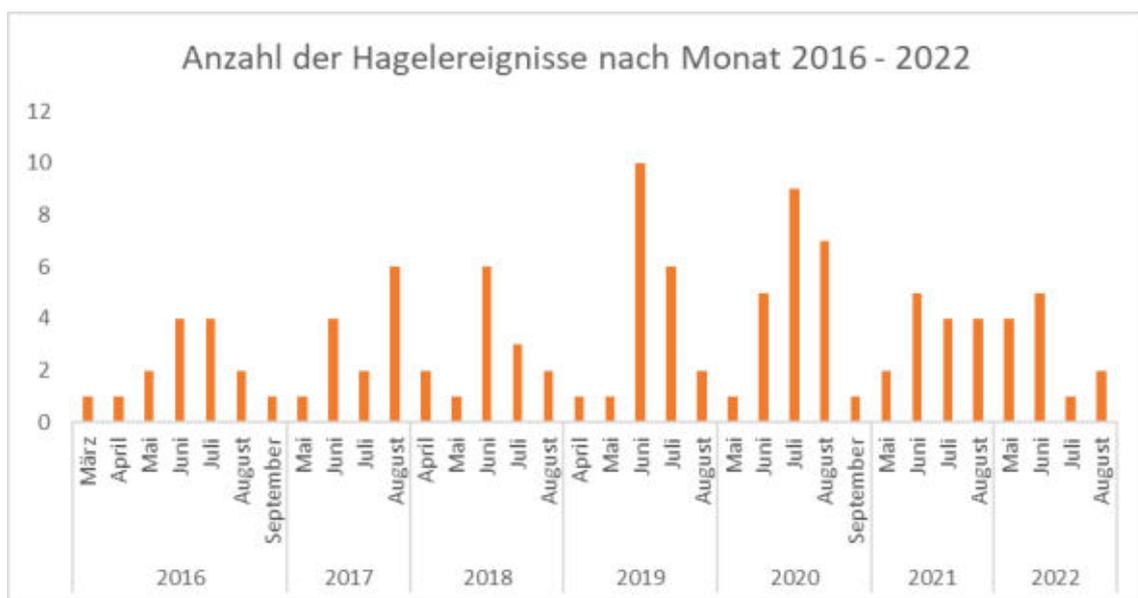


**Abb. E-3:** Summe aller Hagelereignisse pro Bezirk in der Steiermark von 2016 bis 2022 - geographische Lage.

In den Jahren 2019 und 2020 wurden im Untersuchungszeitraum die meisten Hagelereignisse gemeldet, besonders in Deutschlandsberg, Hartberg-Fürstenfeld und Graz-Umgebung (Abb. E-6). Teilweise wurden bis zu neun Hagelereignisse gelistet. Betrachtet man die Hagelereignisse in den einzelnen Jahren pro Monat, so erkennt man, dass 2016, 2018 und 2019 bereits im April von Hagelereignissen berichtet wurde. In den anderen Jahren begann die Hagelsaison im Mai. Bis auf die Jahre 2016 und 2019 endet die Hagelsaison laut den Datenquellen im August und hat ihren Höhepunkt im Juni und Juli (Abb. E-4 & Abb. E-5).



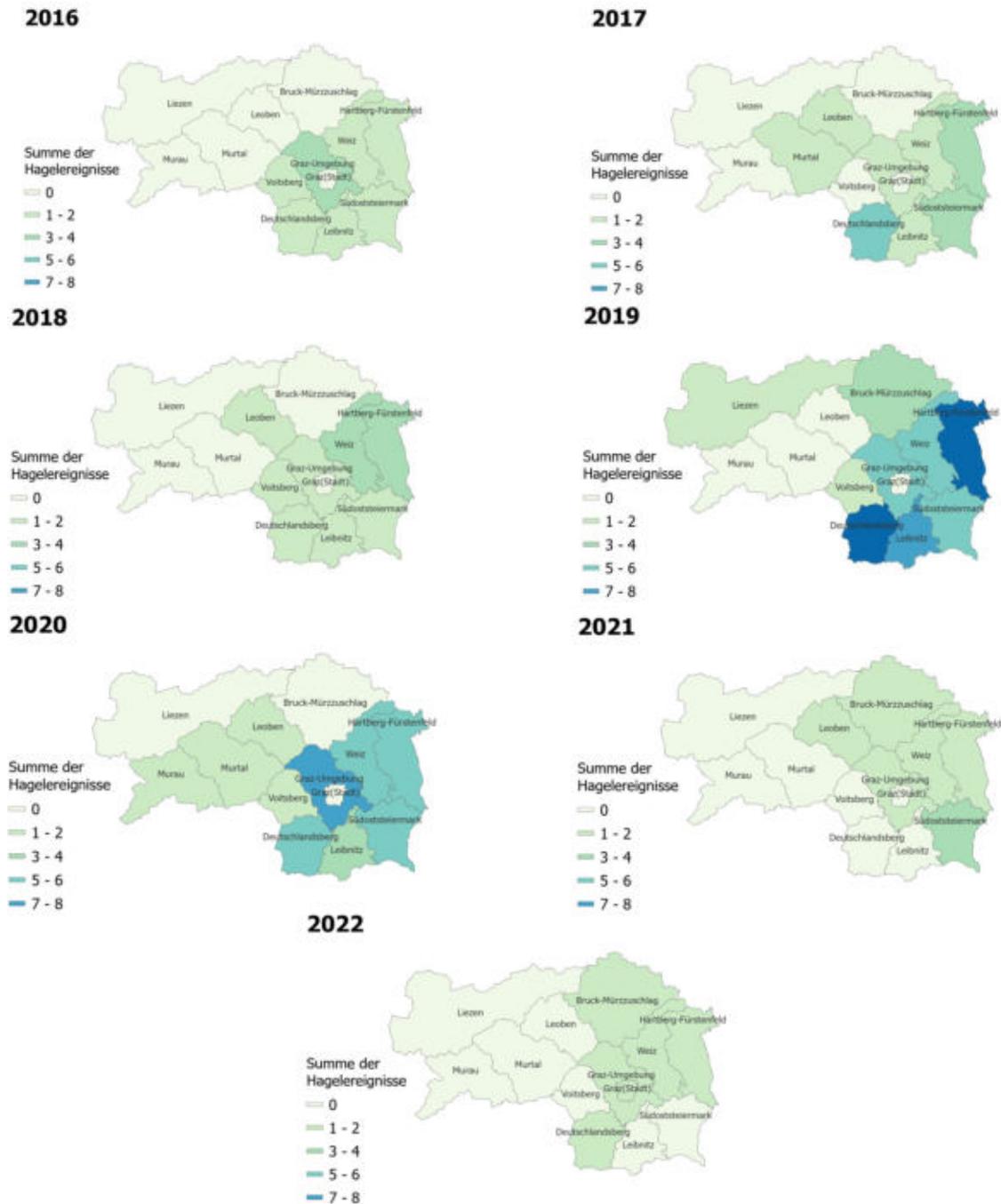
**Abb. E-4:** Anzahl der Hagelereignisse pro Jahr/ Monat in der Steiermark.



**Abb. E-5:** Anzahl der Hagelereignisse nach Monat und Jahr in der Steiermark.

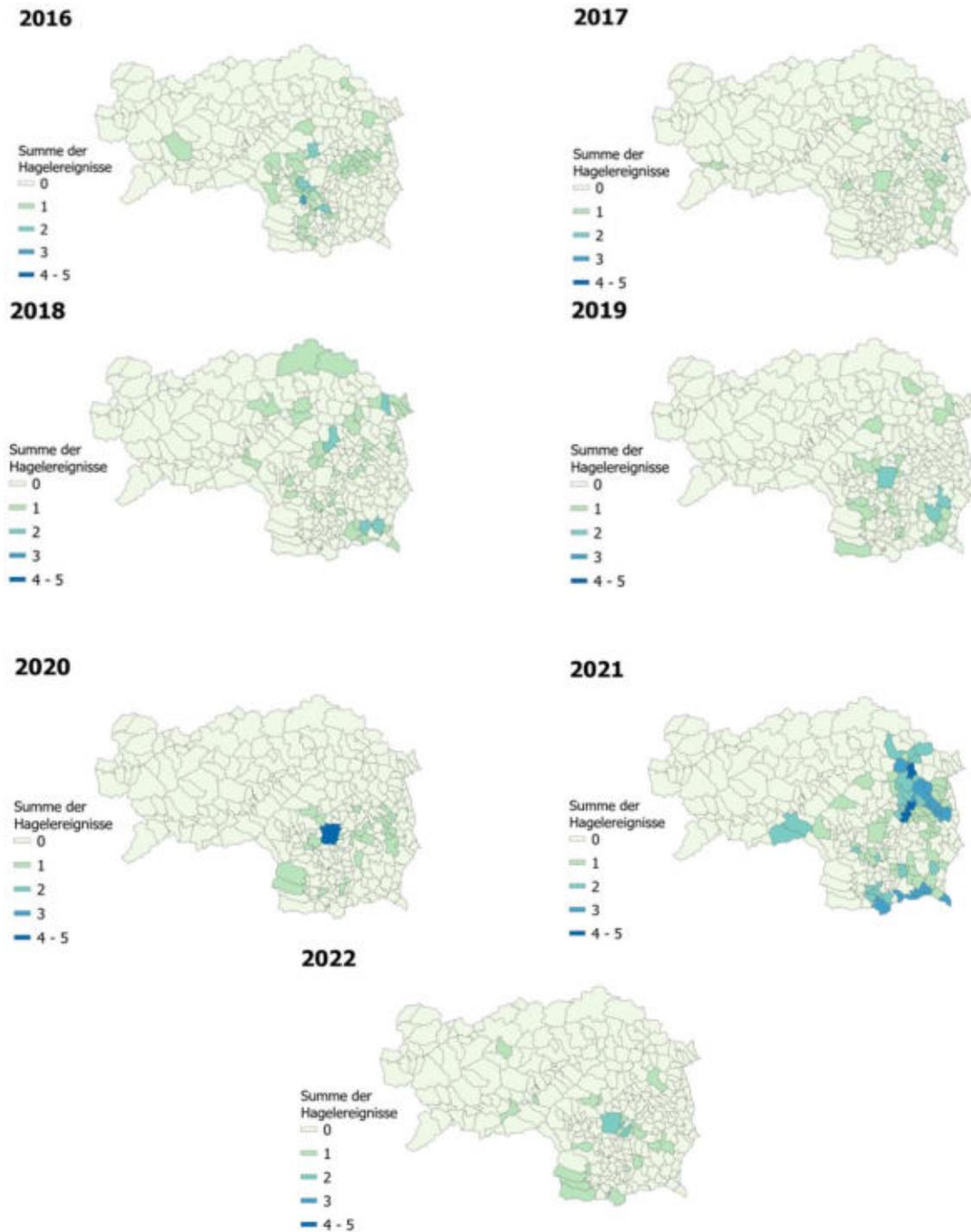
Räumlich betrachtet finden großflächige Hagelereignisse im Untersuchungszeitraum vermehrt im Südosten der Steiermark statt und betreffen nur sehr selten Bezirke in der nördlichen oder westlichen

Steiermark wie Liezen, Murau oder Murtal. Das Fehlen von Berichten über Graz (Stadt) als Bezirk liegt daran, dass die zahlreichen Berichte über die Stadt Graz nur auf Gemeindeebene (Abb. E-6) vorliegen.

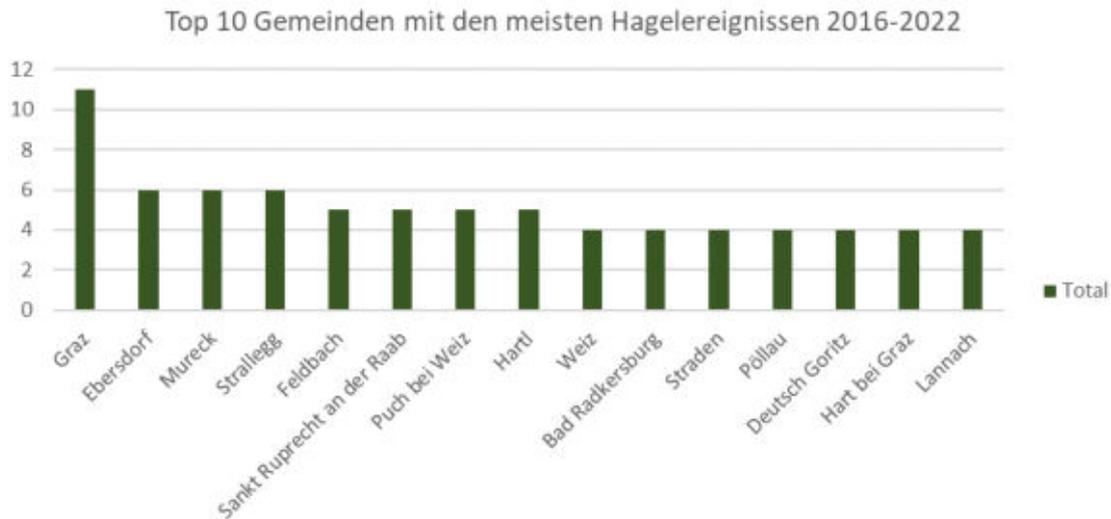


**Abb. E-6:** Räumliche Verteilung der Hagelereignisse pro Bezirk und Jahr in der Steiermark.

Betrachtet man die Hagelereignisse pro Gemeinde im gesamten Untersuchungszeitraum deckt sich die räumliche Verteilung mit der aus den Berichten zu den einzelnen Bezirken. Teilweise waren Gemeinden in einer Hagelsaison auch mehrfach betroffen, dies geschah besonders im Jahr 2021. Hier wurden zahlreiche Gemeinden in der Südoststeiermark und in Hartberg-Fürstenfeld teilweise bis zu fünfmal von Hagelunwettern betroffen (Abb. E-7). Die zehn meistbetroffenen Gemeinden im Untersuchungszeitraum sind in Abb. E-8 aufgeführt. Allen voran steht Graz mit elf Ereignissen in sechs Jahren, gefolgt von Ebersdorf, Mureck und Strallegg mit sechs Hagelniederschlägen.

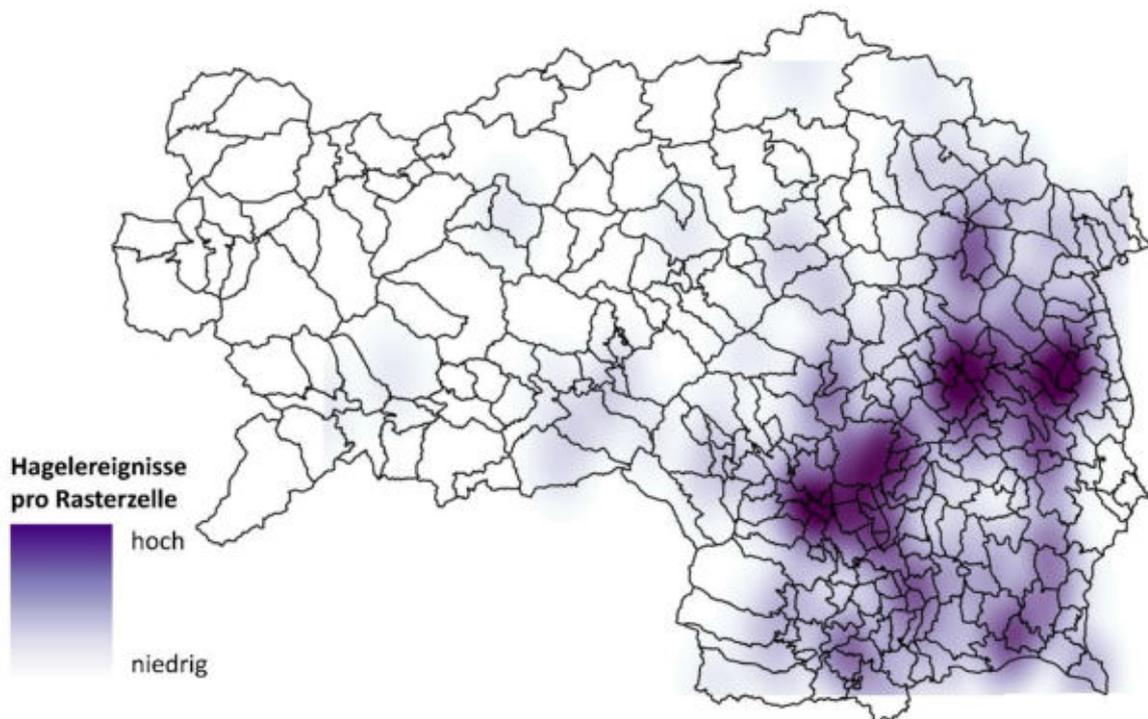


**Abb. E-7:** Räumliche Verteilung der Hagelereignisse pro Gemeinde und Jahr von 2016 bis 2020 in der Steiermark.



**Abb. E-8:** Top 10 der Gemeinden mit den meisten Hagelereignissen von 2016 bis 2020 in der Steiermark.

Abb. E-9 zeigt die Ergebnisse der Kernel-Density Analyse auf Gemeindeebene für den gesamten Untersuchungszeitraum. Die höchste Dichte an Hagelereignissen konnte auch hier in den Gemeinden um Graz, Puch bei Weiz und Ebersdorf festgestellt werden.



**Abb. E-9:** Kernel-Density Analyse auf Gemeindeebene für die Hagelereignisse von 2016 bis 2022 (Rasterzellengröße: 300 \* 300 m). Dunkle Bereiche weisen auf eine verhältnismäßig hohe Anzahl an Hagelereignissen pro Rasterzelle hin, helle Bereiche auf eine niedrige.

Für die Auswahl der Hagelhotspots und zugehörigen Events wurden zusätzlich noch die Angaben der Schadensdaten (Flurschäden, Schadensfläche in ha und Schadenshöhe in €) berücksichtigt, die aus Pressemitteilung, unter anderem von der Hagelversicherung, entnommen werden konnten. Ebenfalls wurde der Anteil der landwirtschaftlichen Fläche an der Gemeindefläche berücksichtigt. Graz selbst

wurde deshalb nicht als Hotspot aufgenommen. Insgesamt wurden drei Bezirke und sieben Gemeinden als Hotspots definiert. In den Hotspot-Gebieten wurden 14 Events zwischen 2016 und 2021 identifiziert, bei denen es zu besonders schweren Schäden gekommen ist (Tab. E-4).

**Tab. E-4:** Hotspots und Hotspotevents.

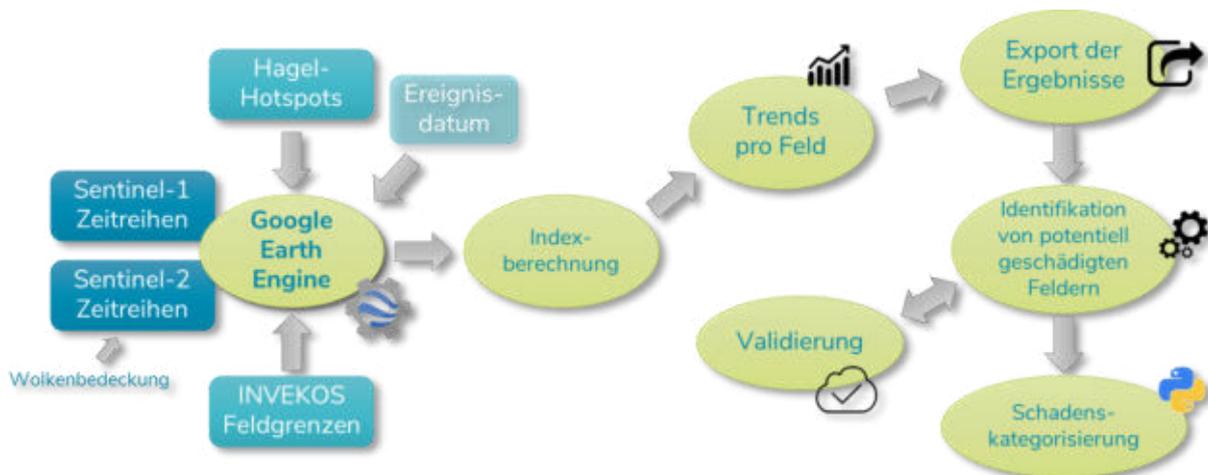
Datum	Bezirk	Gemeinde	Quelle	Schadenshöhe (gesamtes Event) [€]	Schadensfläche (gesamtes Event) [ha]
27.5.2021	Weiz	Dobl-Zwaring	Unwetterchroniken	300.000	1.500
21- 22.6.2021	Hartberg- Fürstenfeld	Pöllau	Unwetterchroniken	500.000	3.000
14.7.2021	Südoststeiermark	Straden	Unwetterchroniken	600.000	2.500
15- 16.8.2021	Deutschlandsberg	Leutasch an der Weinstraße	Unwetterchroniken	2,8 Mio	5.500
14- 16.8.2021	Weiz	Strallegg	Hagelversicherung	2,8 Mio	5.500
29.6.2020	Hartberg- Fürstenfeld		Hagelversicherung	8 Mio	8.000
29.6.2020	Südoststeiermark		Hagelversicherung	8 Mio	8.000
29.6.2020	Weiz		Hagelversicherung	8 Mio	8.000
1.7.2020	Weiz		Hagelversicherung	1,5 Mio	5.500
22.8.2020	Deutschlandsberg		Unwetterchroniken	1,1 Mio	1.500
27.6.2019	Südoststeiermark	Feldbach	ESWD/ Unwetterchroniken	1,5 Mio	2.800
7.7.2019	Deutschlandsberg		Unwetterchroniken	1,3 Mio	6.000
7.7.2019	Hartberg- Fürstenfeld		Unwetterchroniken	1,3 Mio	6.000
7.7.2019	Weiz		Unwetterchroniken	1,3 Mio	6.000
27.7.2019	Südoststeiermark	Feldbach	Unwetterchroniken	3 Mio	12.000
18.7.2019	Hartberg- Fürstenfeld		Hagelversicherung	1,5 Mio	2.500
18.7.2019	Südoststeiermark		Hagelversicherung	1,5 Mio	2.500
18.7.2019	Weiz		Hagelversicherung	1,5 Mio	2.500
4.6.2018	Südoststeiermark	Straden	Unwetterchroniken	1,3 Mio	3.000
21.6.2017	Südoststeiermark	Sankt Anna am Aigen	Unwetterchroniken	-	-
15.8.2016	Hartberg- Fürstenfeld		Unwetterchroniken	2,1 Mio	6.000

## E-5 Auswertung der Hagelschäden in ausgewählten Hotspots

Auf Grundlage von existierenden Ansätzen aus der wissenschaftlichen Literatur haben wir eine weiterführende Methode zur effizienten Ermittlung von Hagelschäden in der Landwirtschaft durch die Kombination von optischen und Radar-Satellitendaten entwickelt und erstmals in Österreich getestet und angewandt. Wir haben verschiedene Indices und Parameter, die in der Literatur erwähnt werden (Tab. E-1 bis Tab. E-3), verwendet und getestet welche Indices am besten für die Detektion von Hagelschäden auf kleinskaligen Feldern verwendet werden können, ohne die betroffenen Felder vorher genau zu kennen.

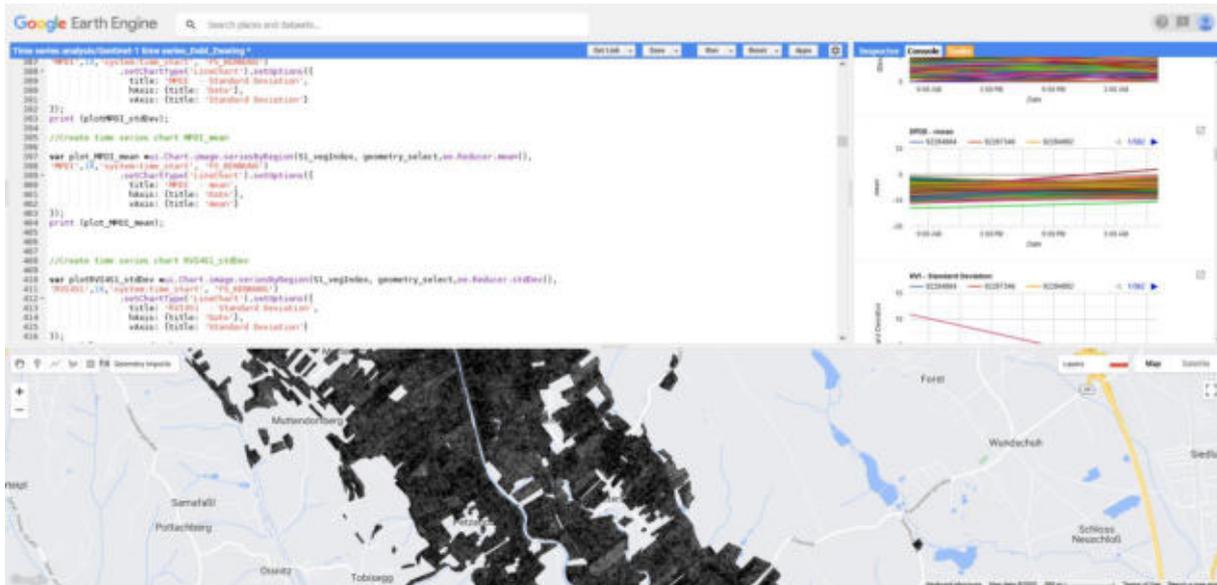
### E-5.1 Workflow - Automatisierung

Für das Detektieren von Hagelschäden in den ausgewählten Hotspots wurde eine Kombination aus der Google Earth Engine (GEE) und Python verwendet. Die GEE bietet die Möglichkeit in einer Cloud zu arbeiten, gleichzeitig sind alle Sentinel Daten (S1 mit Dualpolarisation) bereits vorprozessiert integriert, wodurch S2 und S1 Daten direkt verwendet werden können. In Abb. E-10 ist der Arbeitsablauf schematisch dargestellt.



**Abb. E-10:** Teil-automatisierter Workflow zur Erkennung und Auswertung von Hagelschäden.

Zuerst wurden die INVEKOS Daten der betroffenen Gebiete in die GEE geladen und Satellitenbilder rund um das Ereignisdatum ausgewählt. Anschließend wurden verschiedene statistische Werte der in Tab. E-1 bis Tab. E-3 genannten Indices pro Feld berechnet, um zu testen welche am besten geeignet sind, um potenzielle Hagelschäden zu detektieren (Abb. E-11). Der Median wurde gewählt, um Extremwerte, die zum Beispiel durch Wege im Feld oder an den Randbereichen von Feldern entstehen, auszuschließen. Dies hat jedoch auch den Nachteil, dass kleinräumige Schäden innerhalb eines Feldes, die sich in den Extremwerten widerspiegeln, ausgeschlossen werden. Der Mittelwert wurde deshalb ebenfalls berechnet, um diese Werte miteinfließen zu lassen. Zusätzlich wurde die Standardabweichung verwendet, um auf inhomogene Änderungen in der Feldstruktur schließen zu können und eine mögliche Ernte des Feldes auszuschließen. Eine höhere Standardabweichung deutet dabei auf eine verstärkt heterogene Feldstruktur hin und eine niedrige auf eine homogene Feldstruktur. Die Ergebnisse wurden exportiert und mit Python weiter analysiert, um potenziell geschädigte Felder zu identifizieren. Hierbei wurde auf Veränderungen der Indices vor dem Hagelereignis (Pre-Event) und nach dem Hagelereignis (Post-Event) geachtet und diese als Auswahlkriterien verwendet, um potenziell beschädigte Felder zu identifizieren.



**Abb. E-11:** Beispiel für die Verwendung von in GEE integrierten S1-Daten zur Berechnung von Vegetationsindices.

### **E-5.1.1 Trends/Entwicklung der S2-Indices nach Hagelereignissen**

Für die Analyse der optischen Satellitendaten wurden zunächst Felder mit einer Wolkenbedeckungswahrscheinlichkeit von über 20% und einem Cirrus-Wert von über 0,01 zu den ausgewählten Zeitpunkten aussortiert, da Wolken die optischen Indices beeinflussen bzw. keine Auswertung zulassen. Um einen potenziellen Hagelschaden im Feld zu erkennen, wurde analysiert, ob der Median oder Mittelwert vom NDVI, GNDVI und AVI im Post-Event gesunken sind. Des Weiteren wurde untersucht, ob die Werte vom PSRI und NDWI im Vergleich zum Pre-Event gestiegen sind. Diese Indices beziehen sich auf das Verhältnis vom Chlorophyll und Carotinoidgehalt der Pflanzen. Nach einem Hagelereignis sinkt der Chlorophyllgehalt, während der Carotinoidgehalt ansteigt. Steigt der Median bzw. Mittelwert des PSRI oder NDWI eines Feldes kann dies auf einen potenziellen Hagelschaden hinweisen. Ebenfalls sinkt der LAI Index, dieser kann jedoch durch viel offene Erde, beispielsweise zwischen Kürbispflanzen oder zu Beginn der Phänologie, beeinflusst werden und soll somit nur zusammen mit anderen Indices interpretiert werden (Ha et al., 2022). Wichtig ist auch zu beachten, dass durch die Ernte NDVI und GNDVI ebenfalls sinken, weshalb eine visuelle Kontrolle zusammen mit der Betrachtung der Standardabweichung wichtig ist. Bleibt die Standardabweichung über den Zeitraum des Hagelereignisses hinaus konstant, so kann man auf eine Ernte schließen.

### **E-5.1.2 Trends/Entwicklung der S1-Indices nach Hagelereignissen**

Die Ergebnisse der Zeitreihenanalyse der S1-Indices wurden ebenfalls in Python geladen und ausgewertet. Dabei wurde besonders auf Felder fokussiert, die bei der Analyse mit S2 als potenziell beschädigt klassifiziert wurden, um die Auswertung verlässlicher zu machen und zusätzliche Detailinformationen der Radardaten zu integrieren. Laut Sosa et al. (2021) beschreibt beispielsweise ein geringer DPDD-Wert offene Erde; ein steigender DPDD-Wert lässt auf einen Anstieg der Biomasse schließen. Ein höherer DPDD-Wert weist somit auf eine sehr dichte Vegetation hin. Im Falle eines Hagelereignisses ist daher mit einem Sinken des DPDD-Wertes nach dem Ereignis zu rechnen. Der VDPPi wird verwendet, um Biomasse zu qualifizieren, wodurch dieser Wert ebenfalls nach einem Hagelereignis sinkt. Der MDPI ist sensibel gegenüber Oberflächenrauigkeit und Bodenfeuchte. Daher sollte dessen Wert kurz nach einem Ereignis steigen. Zusätzlich zu diesen Indices wurde das Verhältnis

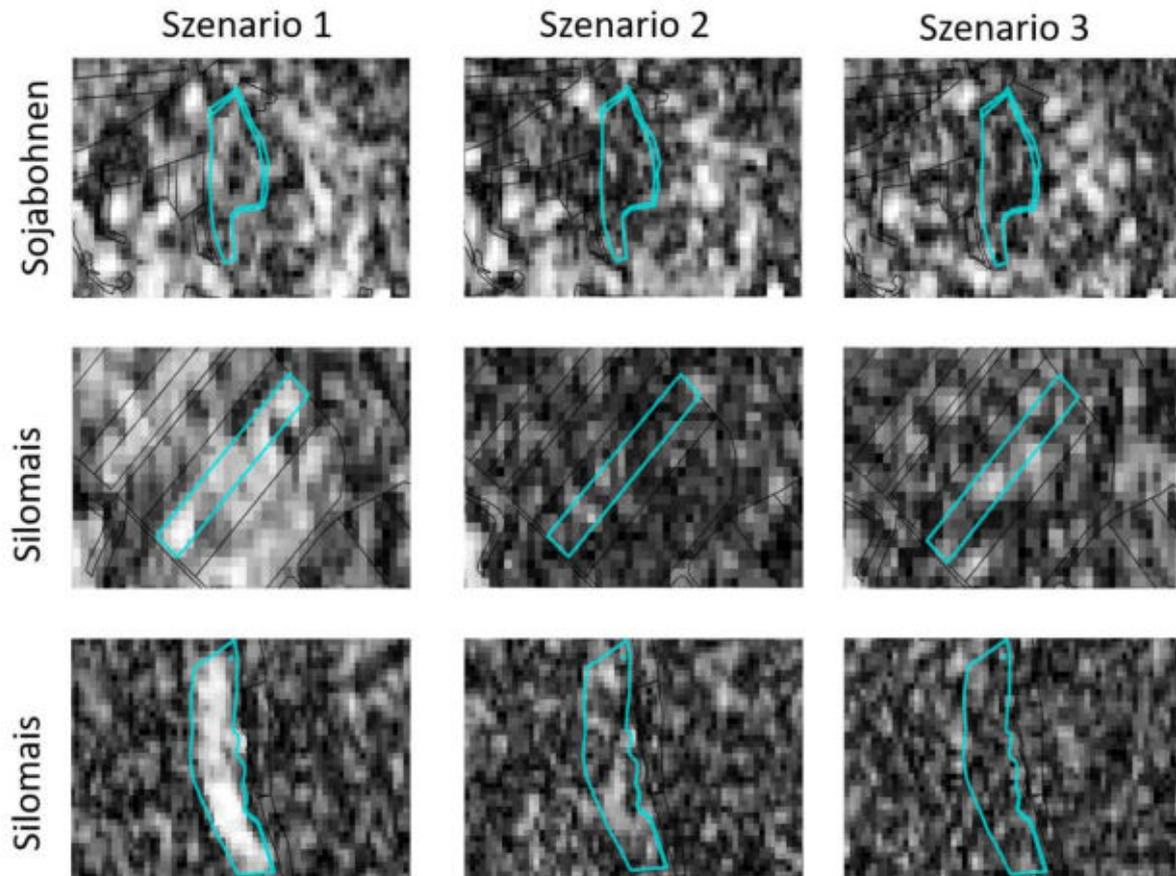
zwischen Cross-Polarisation (VH) zu Dual-Polarisation (VV) (VH/VV Verhältnis) und RVI verwendet (Villarroya-Carpio et al., 2022). Diese Werte sinken nach einem Hagelereignis. Auf längere Sicht nach einem Hagelereignis wird jedoch erwartet, dass beide Werte (VH/VV und RVI) wieder ansteigen, wenn die Vegetation sich wieder erholt.

### ***E-5.1.3 Testen der S1 Kohärenz und deren Eignung***

Zusätzlich zu unserem Workflow haben wir im Rahmen eines Studierendenpraktikums von Frau E. Nafieva die Eignung der interferometrischen Kohärenz basierend auf jeweils zwei S1 Radarbildern unter Verwendung der Phaseninformation untersucht. Die Kohärenz gibt Informationen über die unterschiedliche zeitliche Veränderung im Streuverhalten verschiedener Objekte und kann somit Klassifikationsansätze unterstützen. Die Kohärenz kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Eine niedrige Kohärenz weist auf eine starke Veränderung hin (z. B. bei starken Veränderungen der Vegetation oder durch die Ernte), eine hohe Kohärenz auf stabile Objekte (z. B. Gebäude) und auf wenig Veränderungen. Wir haben drei Szenarien definiert: (1) zwei Szenen vor dem Ereignis, (2) eine Szene vor und eine nach dem Ereignis, und (3) zwei Szenen nach dem Ereignis.

Die Kohärenz wurde mit der SNAP (Sentinel Application Platform) der ESA berechnet. Dabei wurde die Kohärenz von der vertikal/vertikal Polarisation (VV) und der vertikal/horizontal Polarisation (VH) berechnet.

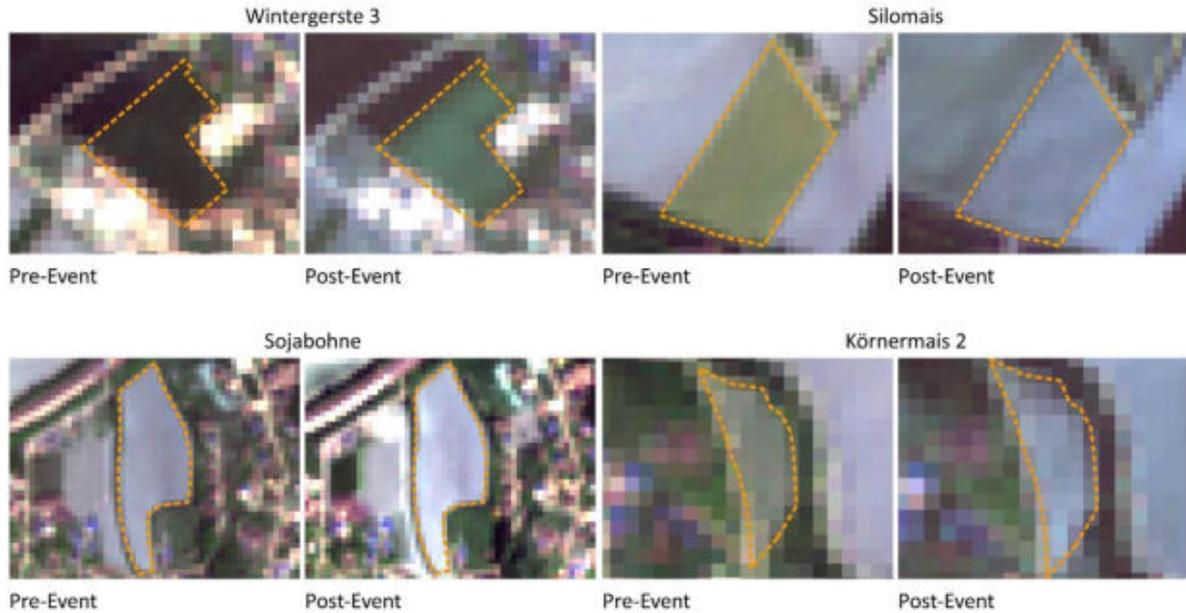
In Abb. E-12 ist die VH-Kohärenz für ein Sojabohnenfeld und zwei Silomaisfelder für die drei Szenarien abgebildet. Helle Pixel weisen dabei auf kaum eine oder keine Veränderung zwischen den beiden Bildern hin und dunkle Pixel auf eine starke Veränderung. Die durchgeführten Tests zeigten, dass die Kohärenzanalyse zwar gewisse Zusatzinformationen liefern kann, allerdings konnten keine eindeutigen Informationen abgeleitet werden, die direkte Rückschlüsse auf Hagelschäden erlauben. Weiterführende Tests sind hier notwendig. Daher wurde die Kohärenz schließlich nicht in den Workflow integriert.



**Abb. E-12:** VH-Kohärenz für ausgewählte Felder (Szenario 1: Pre-Event/Pre-Event; Szenario 2: Pre-Event/ Post-Event; Szenario 3: Post-Event/ Post-Event). Hellere Grautöne bedeuten wenig Veränderung, dunklere Töne stärkere Veränderung.

### E-5.2 Beispiele für Hagelschäden

Im Folgenden werden verschiedene Beispiele für potenzielle Hagelschäden, die durch den beschriebenen Workflow detektiert wurden, gezeigt. In Abb. E-13 sieht man Beispiele für potenziell beschädigte Felder vor (Pre-Event) und nach (Post-Event) einem Hagelereignis am 27.05.2021.



**Abb. E-13:** S2 Bilder vor (Pre-Event) und nach (Post-Event) einem Hagelereignis am 27.05.2021 für potenziell beschädigte Felder. Im Folgenden sind für diese Felder die berechneten Indices als Zeitreihen dargestellt. Für eine bessere Zuordnung der Felder wurden diese bei gleichen Anbauarten nummeriert.

Abb. E-14 zeigt die Verringerung der Pflanzengesundheit und den Anstieg des Wassergehaltes nach besagtem Hagelereignis Ende Mai 2021 für ausgewählte potenziell beschädigte Felder. Nach einer gewissen Zeit erkennt man in der Zeitreihenanalyse eine Erholung der Pflanzen, was sich durch die steigenden Werte der Pflanzengesundheitsindices widerspiegelt. Abb. E-15 zeigt die entsprechenden Veränderungen in der Standardabweichung.

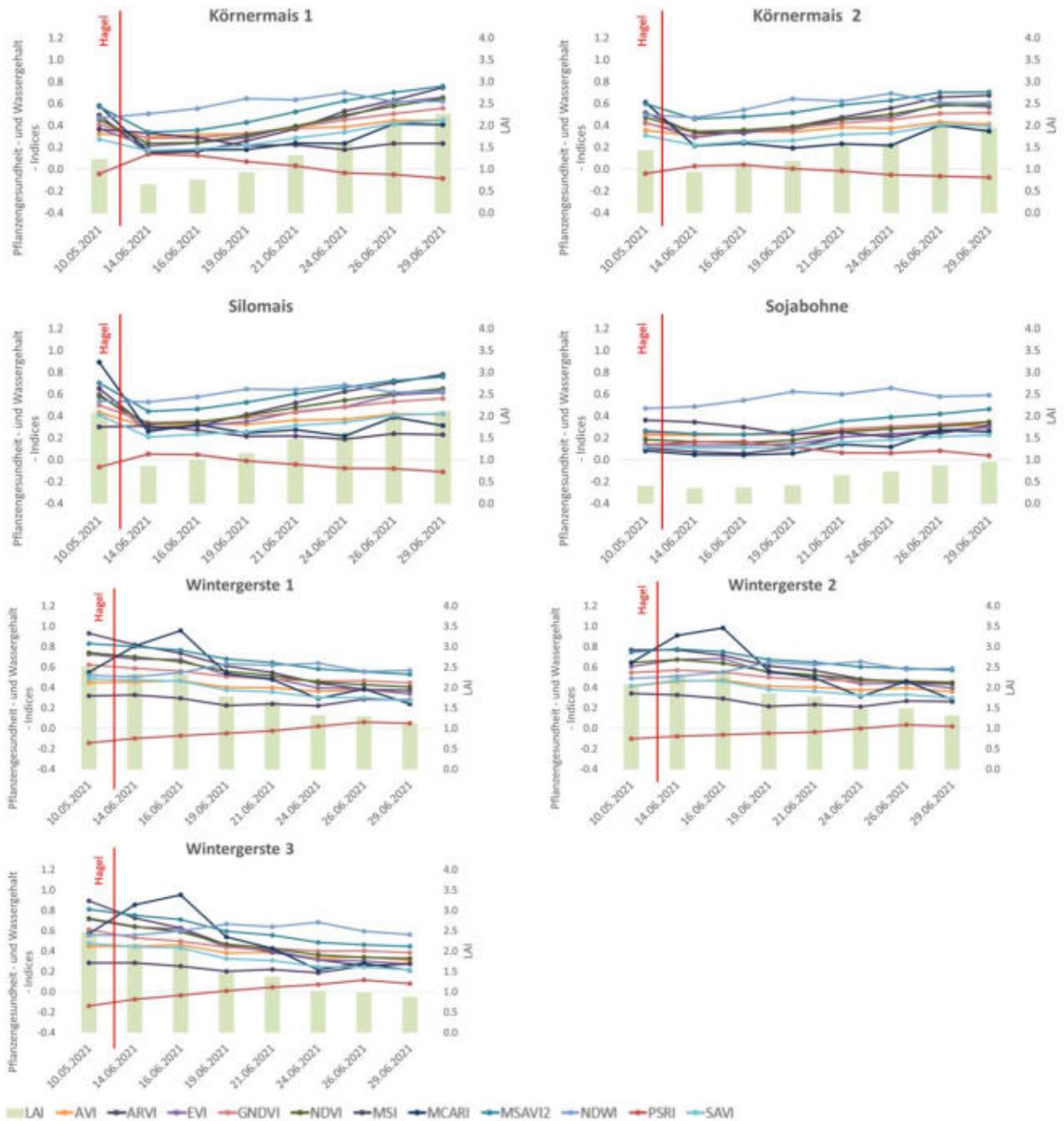
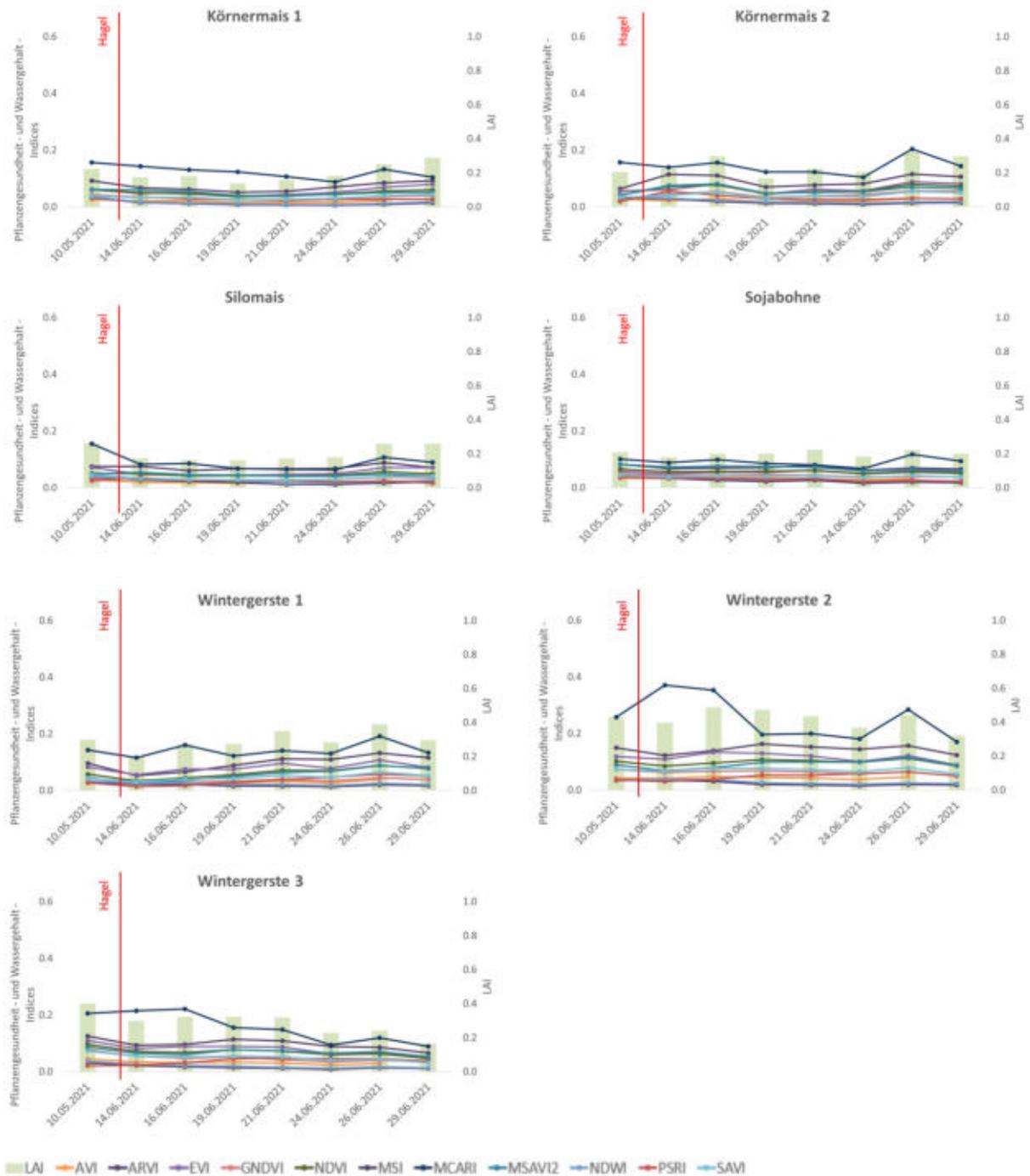
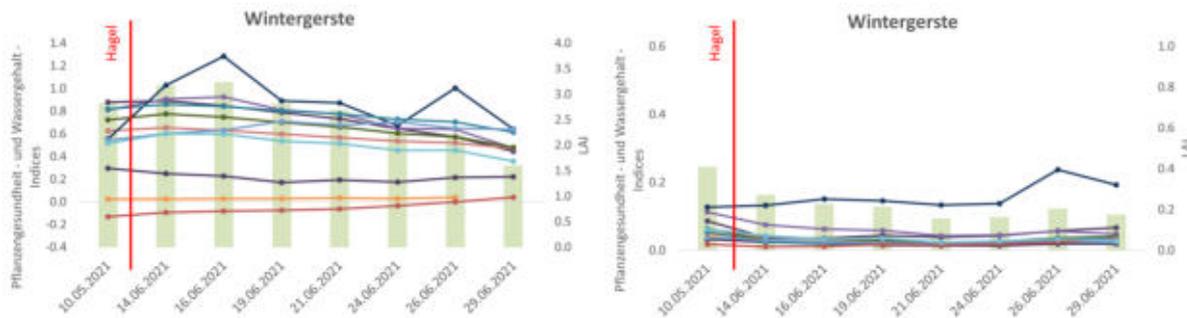


Abb. E-14: Zeitreihe der Mittelwerte der optischen Pflanzengesundheits- und Wassergehaltsindices von potenziell beschädigten Feldern durch ein Hagelereignis am 27.05.2021.



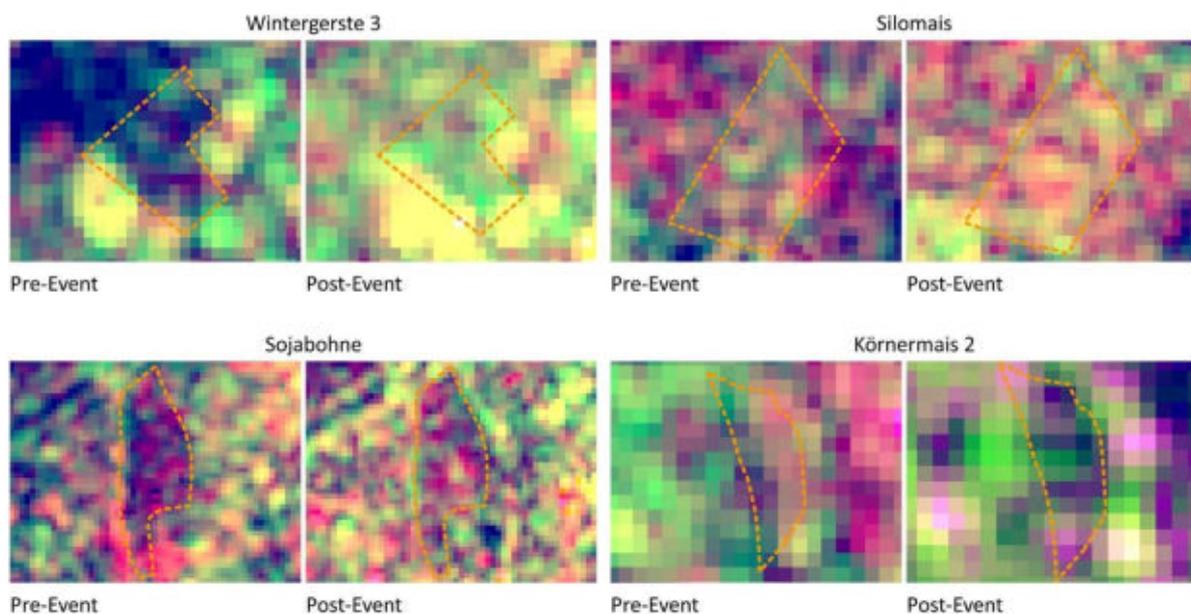
**Abb. E-15:** Zeitreihe der Standardabweichungswerte der optischen Pflanzengesundheits- und Wassergehaltsindizes von potenziell beschädigten Feldern durch ein Hagelereignis am 27.05.2021.

Abb. E-16 zeigt als Vergleich den zeitlichen Verlauf der Vegetationsindizes bei einem nicht beschädigten Feld. Hier erkennt man anhand der Indices ein ununterbrochenes Wachstum.



**Abb. E-16:** Zeitreihe der Mittelwerte (links) und der Standardabweichungswerte (rechts) der Pflanzengesundheits- und Wassergehaltindices eines nicht beschädigten Wintergerstenfeldes.

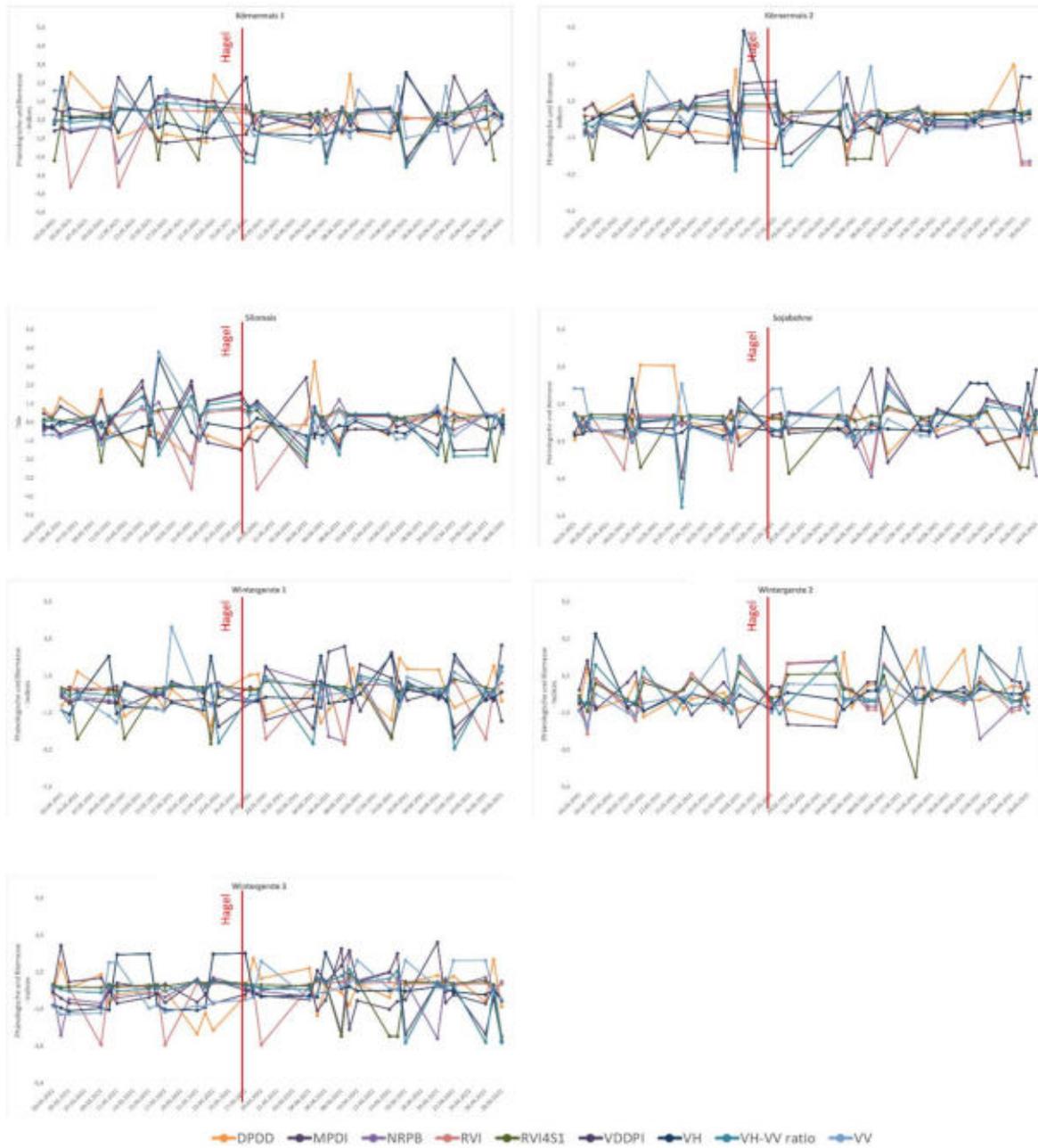
In Abb. E-17 sieht man die S1 Bilder der potenziell beschädigten Felder. Die VH-Polarisation ist empfindlicher für Volumenstreuung von Radarwellen; daher steigen die VH-Werte mit dem Wachstum der Pflanzen. Offener Boden oder spärlich bewachsene Flächen liefern tendenziell höhere Werte in der VV-Polarisation. Eine Veränderung der VH-Polarisation und des VH/VV Verhältnisses nach einem Hagelereignis lässt auf strukturelle Veränderungen schließen (jedoch abhängig vom Vegetationstyp) und kann zur Schadenseinschätzung verwendet werden.



**Abb. E-17:** S1 Bilder von potenziell beschädigten Feldern vor und nach einem Hagelereignis am 27.5.2021, dargestellt in Falschfarben. Rot: VV; Grün: VH; Blau: VH/VV Verhältnis. Das Pre-Event Bild ist vom 23.05.2021 und das Post-Event Bild vom 28.05.2021.

Abb. E-18 zeigt die Zeitreihenanalysen der S1 Indices für die potenziell beschädigten Felder. Abb. E-18 ist komplementär zu den in Abb. E-14 und Abb. E-15 gezeigten Feldern. Auch hier erkennt man das Absinken einiger Indices nach dem Hagelereignis. So zeigte der Vergleich der Indices vor und nach dem Ereignis, dass die Abnahme der Körnermais-Biomasse zu einer erheblichen Abnahme des VDDPI, des VH/VV-Verhältnisses und der VH-Polarisation in den Bildern nach dem Ereignis führte; die Abnahme der Wintergerste-Biomasse wurde am besten durch eine starke Abnahme von RVI, MPDI und DPDD erfasst; der Verlust der Sojabohnen-Biomasse verursachte eine Abnahme des RVI4S1-Werts nach dem Ereignis. Die Ergebnisse zeigen, dass S1 Daten jedoch schwerer zu interpretieren sind

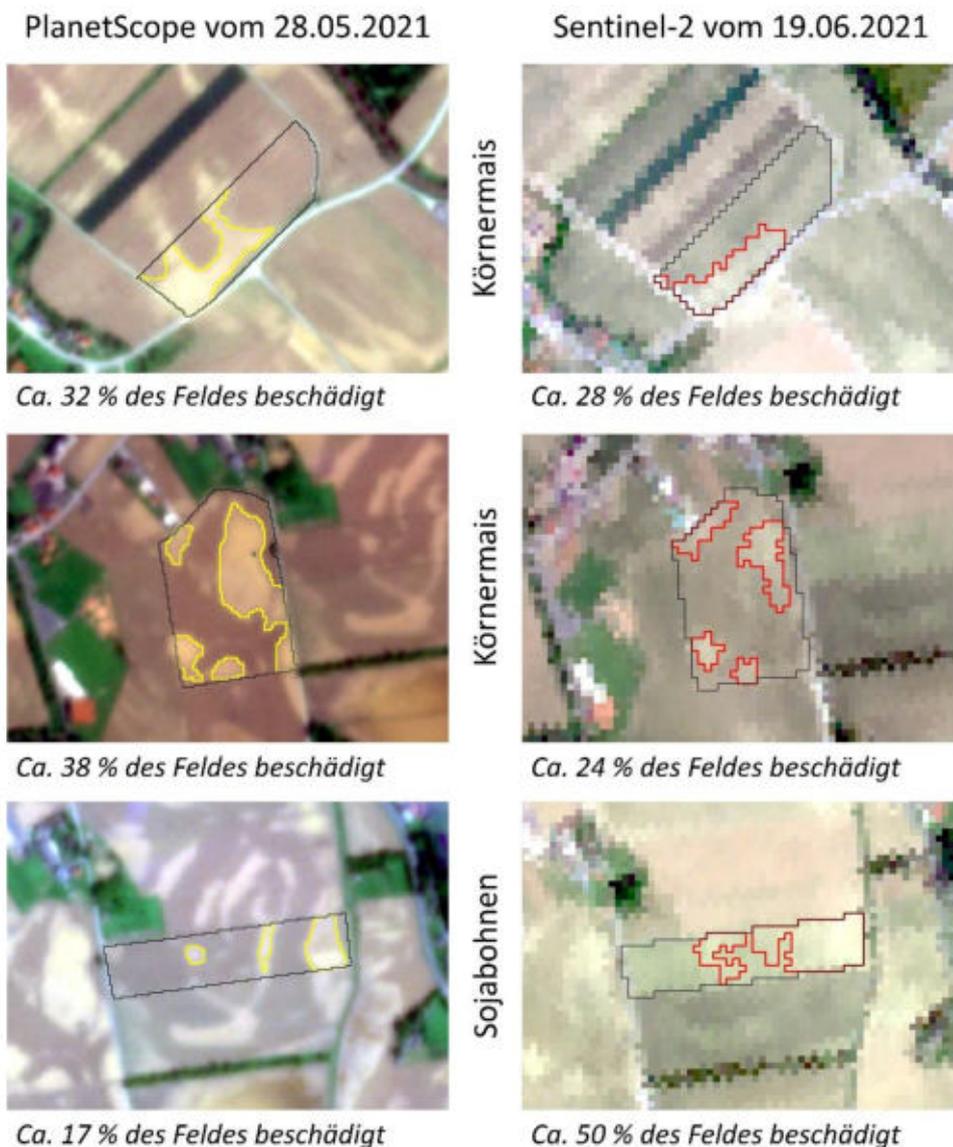
als S2 Daten. Deshalb ist eine detailliertere Analyse erforderlich, da sie empfindlicher gegenüber Veränderungen in der Bodenfeuchte und strukturellen Veränderungen sind (Bell et al., 2020).



**Abb. E-18:** Zeitreihenanalyse der von S1 abgeleiteten Vegetationsindices (Mittelwert). Die rote Linie zeigt das Hagelereignis am 27.05 2021.

## E-6 Schadenskategorisierung und Schadensindex

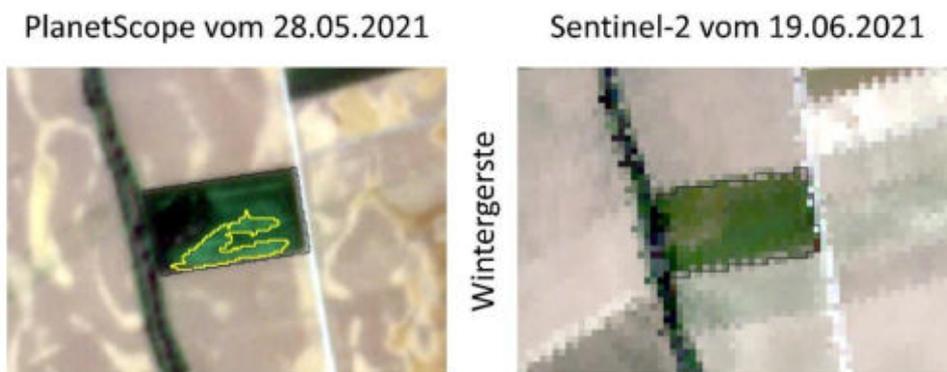
Um den beschädigten Anteil eines Feldes automatisch festzustellen, wurde folgende Vorgangsweise entwickelt. Die über die oben beschriebene Zeitreihenanalyse identifizierten landwirtschaftlichen Flächen wurden mit Hilfe der objekt-basierten Bildanalyse (OBIA) und der Software eCognition (© Trimble) weiter analysiert. Dafür wurde ein Klassifikationsregelsatz entwickelt, um die beschädigten Bereiche innerhalb der Felder zu detektieren. Der erste Schritt war die Segmentierung des Satellitenbildes, d. h. die automatische Gruppierung von benachbarten Pixeln mit ähnlichen spektralen Werten in homogene Bildobjekte. Als nächstes wurden die potenziell beschädigten Bereiche anhand ihrer spektralen Eigenschaften, v. a. der Helligkeit (beschädigte Bereiche erscheinen meist heller als unbeschädigte) und des NDVI (der NDVI der beschädigten Bereiche ist tendenziell niedriger als der von unbeschädigten), klassifiziert. Die als potenziell beschädigt klassifizierten Objekte wurde danach je Feld aggregiert, um den Prozentanteil des Schadens pro Feld automatisch auszuweisen. Die Auswertung geschah sowohl auf Basis von S2 Post-Event Daten als auch basierend auf höher aufgelösten PlanetScope Post-Event Satellitenbildern. Dies erlaubte eine erste Abschätzung, inwieweit die geringere räumliche Auflösung von S2 eine Schadenskategorisierung ermöglicht. Abb. E-19 zeigt Beispiele von Feldern und die detektierten beschädigten Bereiche.



**Abb. E-19:** Beispiele von Feldern (schwarz) und dem Anteil der beschädigten Flächen detektiert mit OBIA auf Basis von PlanetScope (links; gelb) und S2 (rechts; rot). Das Schadensereignis fand am 27.05.2021

statt. Die helleren Strukturen in den Feldern weisen auf Beschädigungen hin. Die unterschiedlich gezackten Linien resultieren von der unterschiedlichen räumlichen Auflösung der Sensoren (PlanetScope: 3 m; S2: 10 m).

Das erste Beispiel in Abb. E-19 (oben) zeigt ähnliche Prozentwerte für PlanetScope und S2. Das zweite Beispiel (Mitte) leicht unterschiedliche Prozentwerte, wobei die räumliche Verteilung aber sehr ähnlich ist. Für das dritte Feld (unten) ergaben sich deutliche Unterschiede. Diese Unterschiede sind einerseits auf die räumliche Auflösung der Daten zurückzuführen, andererseits auch auf den unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkt/Verfügbarkeit der Post-Event Bilder. Das S2 Bild wurde ca. drei Wochen später aufgenommen als das PlanetScope Bild, was zur Folge hat, dass sich die Vegetation in diesem Zeitraum zumindest teils wieder erholen konnte. Abb. E-20 zeigt ein weiteres Beispiel von einem Feld, in dem zwar mit PlanetScope Schäden ausgewiesen werden konnten, allerdings der entwickelte Klassifikationsansatz im S2 keine Schäden identifizierte, obwohl es spektrale Unterschiede im Feld gibt.



**Abb. E-20:** Beispiel für ein Wintergerstenfeld in dem nur mit PlanetScope (links) beschädigte Flächen (gelb; ca. 20% des Feldes beschädigt) festgestellt werden konnten.

Diese Ergebnisse zeigen, dass noch Weiterentwicklungen stattfinden müssen, um einerseits den Anteil des Schadens verlässlicher feststellen zu können und andererseits auch einen weiterführenden Schadensindex zu erstellen, der neben dem prozentualen Anteil idealerweise auch eine Kategorisierung der Schadensstärke (z. B. über die Biomasse) ermöglicht. Im Rahmen dieses initialen Projektes war es nicht möglich hier weiter ins Detail zu gehen und auch die Radardaten miteinzubeziehen, aber die erzielten Ergebnisse zeigen auch, dass Potenzial für eine (zumindest grobe) Schadenskategorisierung mit Satellitendaten besteht.

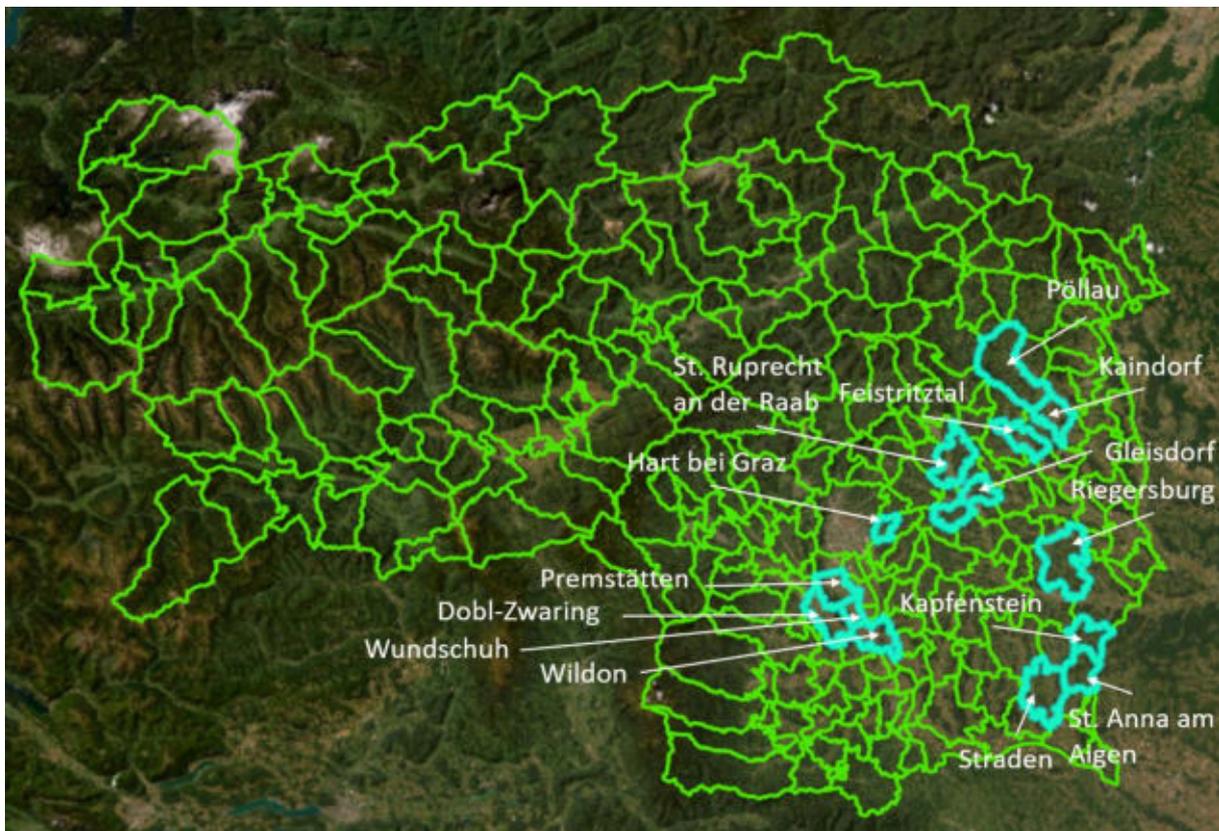
## E-7 Validierung

### E-7.1 Visuelle Interpretation

Basierend auf Pre- und Post-Event S2 Bildern und von hochaufgelösten Satelliten- und Luftbildern verfügbar in Google Earth wurde eine visuelle Interpretation durchgeführt und potenziell beschädigte Felder in den Hotspots identifiziert. Diese punktbasierte Interpretation diente einerseits für einen Vergleich mit den automatisiert detektierten Feldern, und andererseits als Orientierung bei der Feldarbeit.

### E-7.2 Feldarbeit

Für die Validierung der Ergebnisse und das Bestimmen potenzieller Fehlerquellen wurde vom 19.06. bis 24.06. in der Südoststeiermark Feldarbeit durchgeführt. Im Zuge dieser Feldarbeit wurden die Felder unter anderem in den Gemeindegebiet Dobl-Zwaring, Pöllau, Straden, Sankt Anna am Aigen, Premstätten und Feistritztal genauer begutachtet (Abb. E-21).



**Abb. E-21:** Besuchte Gemeindegebiete während der Feldarbeit.

#### E-7.2.1 Heterogene Feldstrukturen

Im Zuge der Feldarbeit wurden besondere Merkmale wie die Topographie und heterogene Feldstrukturen notiert. Insbesondere konnten zahlreiche Windschäden (Abb. E-22) in Getreidefeldern ausgemacht werden, die auch auf Satellitenbildern zu erkennen sind. Diese bilden Strukturen in den Feldern, die auch unabhängig von einem Hagelereignis durch schwere Sturmböen lokal entstehen können und als Schaden klassifiziert werden. Eine Ernte und Weiterverarbeitung von Getreidekörnern

in diesen Bereichen ist nur schwer möglich, da die Ähren durch den Bodenkontakt feucht werden, neu aussprießen oder schimmeln.



**Abb. E-22:** Windwurfschäden in Getreidefeldern bei Riegersburg, Zwaring-Dobl und Wollsdorferegg.

Weitere heterogene Strukturen konnten auch in Maisfeldern ausgemacht werden; hier waren stellenweise noch sehr junge Maispflanzen mit deutlich helleren Blättern in Feldern zu sehen im Vergleich zu den umgebenden Pflanzen sowie Flächen ohne Bewuchs. Besonders unregelmäßig war der Bewuchs auf den Ölkürbisfeldern (Abb. E-23). Hier waren stellenweise nur sehr wenige Pflanzen zu sehen.



**Abb. E-23:** Heterogene Strukturen in Ölkürbisfeldern und einem Maisfeld (unten links).

Bei der Analyse von Hagelschäden mit Satellitenbildern könnten solche Felder mit heterogenen Strukturen teilweise als beschädigt klassifiziert worden sein, besonders wenn das Hagelereignis früh im Jahr zu Beginn der Wachstumsphase stattgefunden hat. Das Vorhandensein solcher Feldstrukturen vor dem Hagelereignis kann in Satellitenbildern teilweise schwer erkennbar sein und auch bei einer visuellen Validierung zu Fehlern führen. Im Feld beobachteten wir, dass der unregelmäßige Bewuchs nicht nur durch Hagelschäden entstanden sein kann, sondern auch, dass nicht alle Samen zur selben Zeit oder gar nicht aufgegangen sind.

Dies kann gemäß den Angaben lokaler Landwirtschaft Betreibender mehrere Gründe haben:

- Zu viel Niederschlag nach der Aussaat, welcher zu einer Verschlämmung des Bodens geführt hat
- Hitze und Trockenheit
- Picken der Saat von Krähen (Krähenfraß)
- Unregelmäßige Dünnung
- Seit 2023: Verbot des Beizmittels. Dieses Jahr wurde von der EU-Kommission ein Beizmittel verboten, das zum Schutz der Saat auf die Kerne von Ölkürbissen, aber auch Mais gegeben wird, bevor diese ausgesät werden. Das hat dazu geführt, dass viele Kerne durch den Niederschlag im Mai und auch durch Krähenfraß nicht gesprossen sind. Bei den Ölkürbissen bedeutet dies, dass teilweise mit einem Ernteausfall von bis zu 80% zu rechnen ist. Dieser wird von der Versicherung ersetzt. Als Gegenmaßnahme wurden besonders schwer betroffenen Landwirtschaft Betreibenden gestattet alternative Feldfrüchte wie Mais und Soja anstelle der Ölkürbisse anzubauen. Aus diesem Grund sahen wir zum Zeitpunkt der Feldarbeit in der zweiten Junihälfte auch noch sehr junge Maisfelder.

### E-7.2.2 Hagelschäden im Mittelalter

Im Zuge der Feldarbeit wurde auch eine Ausstellung zu Hexen auf der Riegersburg besucht, die sich unter anderem mit den damaligen Wetterereignissen in der Steiermark beschäftigte. Auch im Mittelalter gab es in der Steiermark zahlreiche schwere Unwetter mit Hagelereignissen, die die Existenz der Landwirtschaft Betreibenden und des einfachen Volkes bedrohten und zu Ernteaussfällen führten. In der Zeit der kleinen Eiszeit vom 15. Jh. bis zum 19. Jh. kam es zu zahlreichen Wetterextremen zusammen mit Kriegen und der Pest und als Folge kam es zu großen Hungersnöten. Die gläubige Bevölkerung suchte in ihrer Religion nach Schuldigen für ihr Leid. Besonders lokale Wetterphänomene wie Hagel und Sturm konnte man sich damals noch nicht erklären und daher wurden Frauen und Männer als Hexen/Hexer beschuldigt diese Unglücke über andere heraufzubeschwören. Das sogenannte Wettermachen war ein Teil der Anschuldigungen, die den Angeklagten gemacht wurde, ehe sie gefoltert und auf Scheiterhaufen verbrannt wurden (Abb. E-24).



**Abb. E-24:** Riegersburg mit Weinanbau auf der Burg (links), Ausstellung zu Hexen und Hexern und historischen Hagelschäden (Mitte und rechts).

### **E-7.2.3 Agri-PV Anlage**

Ein weiterer Punkt während der Feldarbeit war der Besuch der Versuchsanlage zu Agri-PV vom Amt der Steiermärkischen Landesregierung A 10 Land- und Forstwirtschaft in Haidegg bei Graz. Herr Dr. Steinbauer, Leiter der Versuchsanstalt, gab uns eine Führung über das Gelände (Abb. E-25). In Haidegg werden unter anderem verschiedene Versuche zu Unwetterextremen im Obst- und Weinanbau durchgeführt (Schutz vor Frost, Starkregen, Hagel, etc.). Derzeit gibt es zwei Agri-PV Anlagen auf dem Gelände, die beide in Apfelfelder integriert wurden. Dabei wurden bifaziale PV-Platten verwendet, die im Gegensatz zu Dachanlagen beidseitig Licht aufnehmen um Strom produzieren können und zu 49% lichtdurchlässig sind.

Die ältere Anlage hat einen größeren Reihenabstand als die neue Anlage, was sich bei einem Hagelereignis Ende Mai/Anfang Juni 2023 als leicht problematisch herausgestellt hat. Generell schützen die PV-Platten die Pflanzen vor Hagel und Starkregen und sind dabei sehr stabil (bei dem schweren Hagelereignis sind nur 28 Platten von 1134 zerstört worden), allerdings kann es bei einem zu großen Reihenabstand zum Abprallen der Hagelkörner auf den PV-Platten kommen, die dann in die Bäume der unteren Reihe fallen und diese beschädigen. Als Lösung wird nun ein Hagelnetz zwischen den Platten integriert. Dr. Steinberger sieht die Kombination von PV-Anlagen und Landwirtschaft als zukunftsweisend, den Einsatz von Hagelfliegern als Präventionsmaßnahme jedoch eher kritisch. Agri-PV Anlagen können auch für den Frostschutz eingesetzt werden. Die Pflanzen unter den PV-Anlagen sorgen außerdem für einen Kühlungseffekt der Platten und somit für eine gesteigerte Stromproduktivität an heißeren Tagen. Versuche zum Einfluss der Agri-PV Anlage auf den Ertrag und die Fruchtentwicklung laufen noch.

Vertikale PV-Anlagen werden in Haidegg nicht verwendet, jedoch im Burgenland wo ihre Funktion als Erosionsschutz beim Ackerbau getestet wird.

Probleme:

- Die bauliche Genehmigung, da die Flächennutzung mit der momentanen Gesetzeslage schwierig zu definieren ist: einerseits landwirtschaftliche Nutzung und andererseits gewerbliche Nutzung durch das Einspeisen von Strom.
- Anschluss zum Stromnetz.
- Nicht geeignet bei zu großer Hangneigung.



**Abb. E-25:** Besuch der Agri-PV Versuchsanlage bei Haidegg.

#### **E-7.2.4 Interviews mit Landwirtschaft Betreibenden**

Während der Feldarbeit wurden Gespräche mit mehreren Landwirtschaft Betreibenden geführt, um persönliche Eindrücke zu der Entwicklung der Hagelereignisse in den letzten Jahren, der Effektivität verschiedener Präventionsmaßnahmen und der Auswirkungen von Hagel auf ihren Ertrag zu gewinnen. Auf Grund der Lokalität von Hagelereignissen fielen die Antworten teilweise sehr unterschiedlich aus. Veränderung durch den Klimawandel werden unterschiedlich wahrgenommen, ebenso die Notwendigkeit und Effizienz von Präventionsmaßnahmen. Einigkeit herrschte jedoch bei der Frage wann ein Hagelereignis besonders schadhaft war: während der Blüte, Fruchtreife und Ernte.

Erdbeerbauer (Hart bei Graz):

- Hagelschäden bei Erdbeeren:
  - Hagelereignis im Mai 2023 hat die Blätter von den Pflanzen durchlöchert und abgerissen, aber noch keine Früchte beschädigt bzw. die noch grünen, kleinen Erdbeeren wiesen keine zu großen Schäden auf.
  - Pflanzen haben sich gut erholt, keine großen Ernteverluste.
  - Keine Versicherung, da diese sehr teuer ist für Erdbeeren.
- Veränderung der Hagelereignisse:
  - Ist generell weniger betroffen von Hagelereignissen und sieht keine große Veränderung zu den letzten Jahren.
- Hagelpräventionsmaßnahmen:
  - Sieht den Einsatz von Hagelfliegern als Präventionsmaßnahme als sehr nützlich an

Ölkürbisbauern/-bäuerinnen (Kaindorf bei Hartberg):

- Dieses Jahr ist der Ölkürbisbau besonders schwierig durch das Beizmittelverbot.
- Bekommen bei Ernteaussfällen 30-80% von der Versicherung erstattet.

- Hagelschäden bei Ölkürbissen:
  - Besonders problematisch bei Fruchtreife, da beschädigte Früchte sehr schnell verschimmeln und die Blätter, welche normalerweise noch Schutz bieten vor der Reife, absterben.
- Veränderung der Hagelereignisse:
  - Haben in den letzten Jahren keine wirklichen Unterschiede bei den Hagelereignissen feststellen können: „Es gab immer schon Jahre mit stärkeren Ereignissen und mildere Jahre“.

Apfelbauernhof Kobler und Apfelbauernhof Darnhofer (Wollsdorferegge): Apfelanbauflächen mit Hagelnetzen (Abb. E-27).

- Hagelschäden bei Äpfeln:
  - Besonders problematisch während der Blüte, da hier die Hagelnetze noch nicht aufgebaut werden wegen der Gefahr von Schnee, und kurz vor der Ernte.
  - Immer strengere Auflagen der EU und des Handels was Qualität und Charakteristik der Äpfel betrifft (Größe, Form, Zuckergehalt, Farbe). Als Folge werden Äpfel mit kleineren Schäden (Dellen durch Hagel oder Wurmstich (Abb. E-26), etc.) bereits während der Wachstumsphase aussortiert, um das Wachstum makelloser Äpfel zu fordern. Bei der Ernte werden beschädigte Äpfel für ein Viertel des Verkaufspreises an die Industrie z. B. zur Herstellung von Apfelsaft verkauft.



**Abb. E-26:** Leichter Hagelschaden bei einem jungen Apfel

- Bei einem Hagelschaden wird dieser der Hagelversicherung gemeldet; diese schickt eine/einen Sachverständige/n für eine Feldbegehung. Dabei kommt es zu einer Schadenseinschätzung und später zu einer Auszahlung, was bisher kein Problem darstellte.
- Es gibt verschiedene Versicherungsarten: Baumversicherung, Hagelnetzstützenversicherung, etc.
- Veränderung der Hagelereignisse:
  - Stärkere und mehr Hagelereignisse in den letzten Jahren.
  - Änderung der Wetterlagen: mehr Westwetterlagen mit stärkeren Unwettern; früher: häufiger Unwetter aus dem Nordosten, welche weniger heftig sind.
  - Lage in einem Wetterscheidegebiet.
- Hagelpräventionsmaßnahmen: Hagelnetz
  - Hagelnetze kosten ca. 30.000 €/ha → teure Investition am Anfang und aufwendig zu installieren (mittlerweile aber optimiert durch den Einsatz spezieller Maschinen).
  - Erste Netze 1984, dann über die Jahre immer mehr bis alle Felder Hagelnetze hatten.

- Lebensdauer: Schwarze Netze 15 Jahre; weiße Netze 8-10 Jahre (lassen mehr Licht durch, was zu einer kräftigeren Farbe der Äpfel führt).
- Unterschiedliche Befestigungsmaterialien: Holz (dehnbarer), Metall, Beton (bricht leichter bei hohen Belastungen).
- Reißen an den "Schnallen" bei hoher Belastung durch starke Hagelereignisse oder Schnee im Frühjahr → Austausch und Ersatz notwendig (Abb. E-28).
- Zusätzlicher Zeitaufwand durch das Zusammenrollen im Winter und Ausrollen im Frühjahr.
- Hagelpräventionsmaßnahmen durch PV-Anlagen
  - Eher kritisch; sehen nicht ausreichenden Schutz der Bäume bei Änderung der Windrichtung während einem Hagelereignis.
  - Können wegen der Hanglage keine installieren.



**Abb. E-27:** Apfelbauernhof Kobler - Hagelnetze mit Stahlkonstruktion.

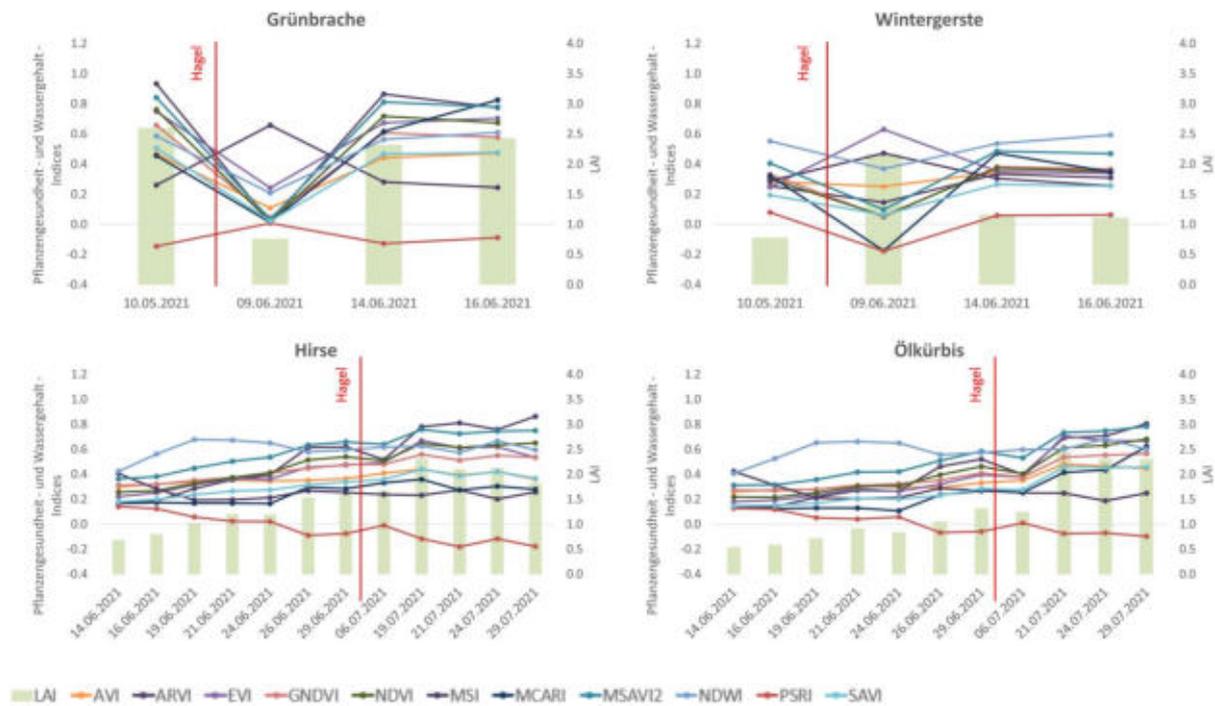


**Abb. E-28:** Beschädigung des Hagelnetzes und Aufbau bei Apfelbauernhof Darnhofer; Hagelnetz mit Holzkonstruktion.

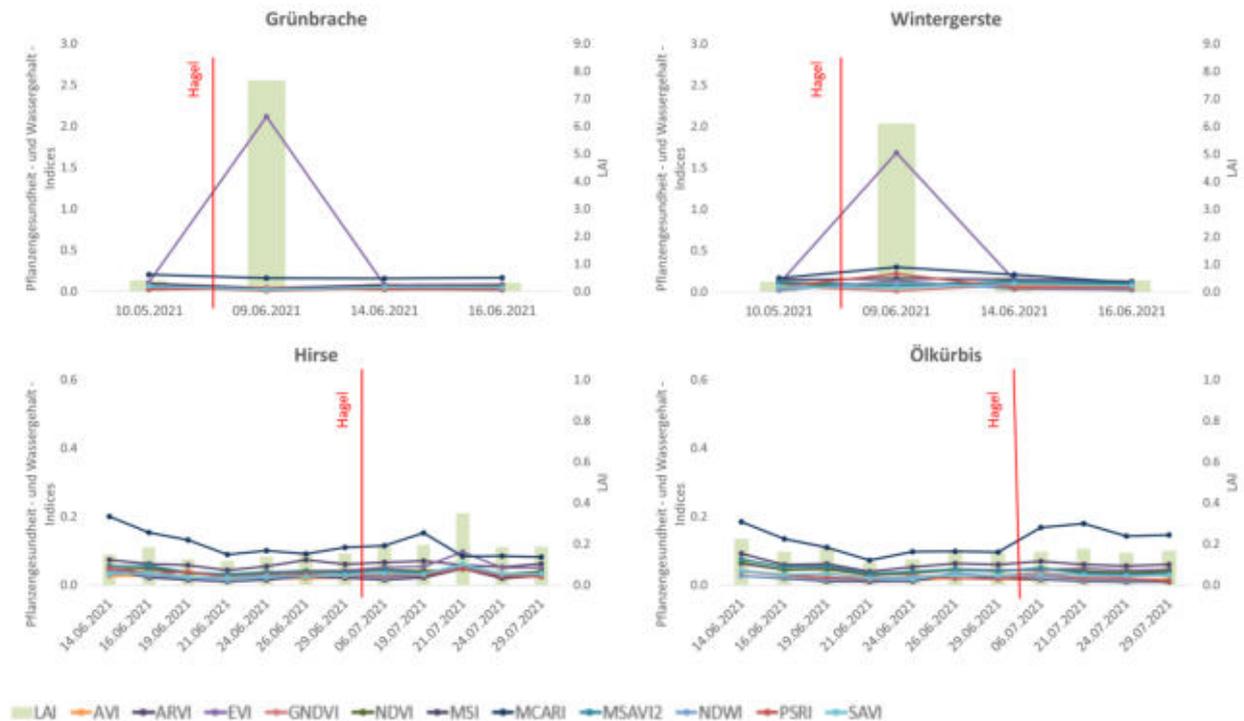
### E-7.3 Validierung durch Hagelversicherung

Nach den durchgeführten Modellläufen wurden ausgewählte Felder, die als potenziell beschädigt identifiziert wurden, der Hagelversicherung zur Validierung übermittelt. Diese gaben uns positives Feedback zu unserer Arbeit und bestätigten den detektierten Hagelschaden bei zahlreichen von ihnen versicherten Feldern (ca. 80% der von uns identifizierten und bei ihnen versicherten Felder wiesen auch wirklich Schäden auf). Aus Gründen des Datenschutzes dürfen diese nicht genauer aufgeführt werden.

Abb. E-29 und Abb. E-30 zeigen die Zeitreihenanalysen von ausgewählten beschädigten Felder. Man erkennt den Anstieg der Wassergehaltsindices und den Abfall der Pflanzengesundheit nach dem Hagelereignis.



**Abb. E-29:** Zeitlicher Verlauf der Feldmittelwerte der S2 Pflanzengesundheits- und Wasserindices von Feldern mit Hagelschäden, welche durch die Hagelversicherung validiert wurden (oben: Hagelereignis am 25.07.2021; unten: Hagelereignis am 30.06.2021).



**Abb. E-30:** Zeitlicher Verlauf der Standardabweichung im Feld der S2 Pflanzengesundheits- und Wasserindices von Feldern mit Hagelschäden, welche durch die Hagelversicherung validiert wurden (oben:

Hagelereignis am 25.07.2021 (Anmerkung: andere Achsendarstellung!); unten: Hagelereignis am 30.06.2021).

## E-8 Dissemination

Eine Reihe an verschiedenen Disseminationsaktivitäten fand statt. Dies umfasste die Präsentation von Teilergebnissen auf zwei wissenschaftlichen Konferenzen (European Geosciences Union (EGU) General Assembly, Österreichischer Klimatag) und die damit verbundene Publikation von Konferenzbeiträgen:

1.) Streifeneder, V., Hölbling, D., Dabiri, Z., 2023. Impact of hail events on agriculture: A remote sensing-based analysis of hail damage in the context of climate change. EGU General Assembly 2023, Wien, Österreich, 24–28 April, EGU23-2551. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-2551> (Abstrakt und Poster).

2.) Streifeneder, V., Hölbling, D., Dabiri, Z., 2023. Auswirkungen von Hagelereignissen auf die Landwirtschaft: Eine fernerkundungsbasierte Analyse von Hagelschäden im Kontext des Klimawandels (HAGL). 23. Österreichischer Klimatag, Leoben, Österreich, 11-13 April. [https://ccca.ac.at/fileadmin/00\\_DokumenteHauptmenue/03\\_Aktivitaeten/Dialogveranstaltungen/OEsterreichischer\\_Klimatag/2023\\_Tagungsband\\_final.pdf](https://ccca.ac.at/fileadmin/00_DokumenteHauptmenue/03_Aktivitaeten/Dialogveranstaltungen/OEsterreichischer_Klimatag/2023_Tagungsband_final.pdf) (Tagungsband mit Abstrakt) bzw. [https://ccca.ac.at/fileadmin/00\\_DokumenteHauptmenue/03\\_Aktivitaeten/Dialogveranstaltungen/OEsterreichischer\\_Klimatag/P19\\_Streifeneder.pdf](https://ccca.ac.at/fileadmin/00_DokumenteHauptmenue/03_Aktivitaeten/Dialogveranstaltungen/OEsterreichischer_Klimatag/P19_Streifeneder.pdf) (Poster).

Weitere Publikationen sind angedacht, konnten aber während der Laufzeit des Projektes noch nicht umgesetzt werden.

Darüber hinaus wurde das Projekt und ausgewählte Ergebnisse im Rahmen einer Übersichtspräsentation über Forschungsaktivitäten in der Forschungsgruppe "Risk, Hazard & Climate" am Fachbereich Geoinformatik auf der GI\_Salzburg 2023 Konferenz präsentiert, und es erfolgte die Teilnahme und der Austausch mit Expert:innen aus der Wissenschaft und Praxis bei den Disaster Research Days 2022 in Innsbruck. Die Konferenzen wurden auch genutzt, um Rückmeldung zu erhalten, neue Kontakte zu knüpfen und mögliche weiterführenden Forschungs- und Kooperationsmöglichkeiten zu diskutieren.

Zusätzlich zu der Kooperation mit der Österreichischen Hagelversicherung und den oben beschriebenen geknüpften Kontakten während der Feldvalidierung haben wir auf den wissenschaftlichen Konferenzen und auch darüber hinaus neue Kontakte hergestellt und uns mit zahlreichen Wissenschaftler:innen und Praktiker:innen von unterschiedlichen Institutionen ausgetauscht. Dies umfasst unter anderem die Technische Universität (TU) Graz (Hagelschäden in der Landwirtschaft, Analyse von Wetterradar und UAV Daten, Crowdsourcing, etc.), die Steirische Hagelabwehr (Informationen über Hagelschäden und Fachtagung zur Hagelabwehr), Remote Sensing Solutions (München, Deutschland) und TU Delft (Niederlande) (Verwendung von Sentinel-1/2 für das Monitoring von landwirtschaftlichen Flächen mit Fokus auf SAR Daten, etc.), Universität für Bodenkultur (BOKU) Wien (Verwendung von meteorologischen Daten, etc.), Johann Heinrich von Thünen Institut (Braunschweig, Deutschland) (Verwendung von Copernicus Daten und künstlicher Intelligenz für die Analyse von landwirtschaftlichen Flächen, etc.), Fachhochschule (FH) Kärnten (Ertragsabschätzung mit Fernerkundungsdaten, etc.), TU München (Zeitreihenauswertung von Fernerkundungsdaten, etc.) und Agroscope (Schweiz) (Modellierung von Hagelschäden in der Landwirtschaft, Analyse von Wetterradar Daten, Auslotung von Kooperationsmöglichkeiten, etc.).

Außerdem eruierten wir eine mögliche zukünftige Zusammenarbeit mit einer Schule im Untersuchungsgebiet (BG/BRG Gleisdorf). Während der Feldarbeit gab es auch ein persönliches Treffen mit einem Lehrer, mit dem wir Möglichkeiten erörterten, wie wir Forschung in die Schule bringen können und Schülern und Schülerinnen lokales Wissen beitragen könnten (Stichwort: Citizen Science). Leider war es im Rahmen der Feldvalidierung nicht möglich das Projekt in der Schule vorzustellen, aber dies wurde als vielversprechende Möglichkeit für zukünftige Projekte angesehen. Der Austausch mit der Schule eröffnete auch weitere Kontakte zu Landwirtschaft Betreibenden (siehe Kapitel E-7.2).

Die Erkenntnisse aus dem Projekt wurden auch in der Lehre an der Universität Salzburg integriert, insbesondere die Auswertung der Radardaten (Lehrveranstaltungen "Lectures in GIScience" und "Analysis and Modeling (Remote Sensing)"). Daraus ergab sich auch das oben erwähnte studentische Praktikum von Frau E. Nafieva.

Weiteren Disseminationstätigkeiten umfassten Einträge über Projekt auf Webseiten, z. B. der Forschungsgruppenwebseite (<https://www.plus.ac.at/geoinformatik/research/research-areas/risk-hazard-climate/projects/hagl/?lang=en>), und Verbreitung der Forschungsarbeiten auf ResearchGate, PLUS Research, etc. Außerdem wurde ein Projektlogo (Abb. E-31) entworfen, welches auf Präsentationen, Postern und Webseiten verwendet wurde, um den Wiedererkennungswert des Projektes zu steigern.



**Abb. E-31:** HAGL Projektlogo.

## E-9 Zusammenfassung und Ausblick

In Hinblick auf die zu erwartende Zunahme von schweren Hagelereignissen durch den Klimawandel ist die Entwicklung von robusten, effizienten und kostengünstigen Fernerkundungsmethoden für die Detektion von Hagelschäden in der Landwirtschaft sehr relevant. Unser Projekt HAGL hat gezeigt, dass es möglich ist mit frei verfügbaren Satellitendaten Schäden auf landwirtschaftlichen Flächen zu detektieren. Im Zusammenhang mit Unwetterdaten kann damit auf Hagelschäden geschlossen und wertvolle Informationen über betroffene Flächen bereitgestellt werden. Die Kombination aus S1 und S2 Daten ermöglicht die Ermittlung von Schäden bereits kurz nach dem Unwetter, durch das Erkennen von strukturellen Veränderungen und durch ungewöhnliche Veränderungen von spektralen S2-Indices, die Aufschluss über die Pflanzengesundheit und Biomasse geben. Eine Voraussetzung für die Verwendung von optischen Daten ist allerdings die Verfügbarkeit von wolkenfreien Satellitenbildern. Durch die Kombination mit wetterunabhängigen Radardaten konnten die Auswertungen noch effizienter gestaltet und zusätzliche Informationen über die Hagelschäden und Vegetationsentwicklung gewonnen werden. Unser Ansatz basiert auf einer automatisierten Analyse von Zeitreihen von Satellitendaten in der GEE, was den Vorteil hat, dass auf eine große Menge an vorhandenen Daten zugegriffen werden kann und die Analysen performant durchgeführt werden können. Von wesentlicher Bedeutung war auch der produktive und erkenntnisreiche Austausch mit der Österreichischen Hagelversicherung, was für das Projekt ein wichtiger Erfolgsfaktor war.

Das Projekt stellte einen idealen Rahmen für initiale Entwicklungen dar. Trotz der ersten, positiven Ergebnisse sind aber noch zahlreiche Fragen offen und weiterführende Forschungsfragen aufgetaucht, die in diesem kleinen Rahmen nicht oder nur teils adressiert werden konnten. In Zukunft gilt es die Methode weiter zu verbessern, verfeinern, automatisieren, und auf andere Gebiete zu übertragen. Dies umfasst eine verlässlichere Detektion von beschädigten Feldern und gleichzeitig den Ausschluss von Flächen, die zwar eine Veränderung aufweisen, welche aber nicht durch Hagel verursacht ist (z. B. Ernte, Düngung, heterogene Feldstruktur), oder ein übertragbares Schema zur Schadenserkenkung und -kategorisierung. Andererseits kann eine stärkere Einbindung von Wetterdaten es ermöglichen Schäden leichter zu lokalisieren, da Hagelereignissen sehr lokal auftreten können und um Hagelschäden von anderen Extremwetterschäden wie beispielsweise Windwurf zu unterscheiden. Weiterführende Forschungsarbeiten und Anträge für größere Nachfolgeprojekte in diese Richtungen sind geplant.

Die Hagelversicherung zeigte sich interessiert an neuen Methoden und Ansätzen und bestätigte auch das Interesse an einer weiteren Zusammenarbeit, um die Methode zu verbessern und idealerweise auch für die Praxis einsetzbar zu machen. Ein weiterer Kontakt besteht zum Schweizer Projekt "scClim" von Agroscope, welches versucht Hagelschäden vorherzusagen. Hier könnte unsere Analysemethode als Validierungsmaßnahme verwendet werden und Informationen bereitstellen, die auch für die Schweizer Hagelversicherung interessant sein könnte. Eine zukünftige Möglichkeit wäre auch die Bereitstellung unserer Ergebnisse als Webtool für Landwirtschaft Betreibende, damit diese sich zeitnahe über Schäden in ihren Feldern informieren können, was vor allem für Großbauern interessant sein könnte, und auf Basis von wissenschaftlichen Informationen entsprechende Anpassungsmaßnahmen vornehmen könnten.

## E-10 Danksagung

Wir danken der Österreichischen Hagelversicherung für die wertvolle Unterstützung und der ESWD (<https://www.eswd.eu>) und dem ESSL (<https://www.esssl.org/cms/>) für die kostenlose Bereitstellung ihrer Wetterdaten. Außerdem bedanken wir uns für die zahlreichen Diskussionen, Rückmeldungen und Anregungen und bei all jenen, die uns bei der Feldvalidierung mit ihrem Praxiswissen unterstützt haben.

## E-11 Literaturverzeichnis

- Angearu, C.-V., Ontel, I., Irimescu, A., Sorin, B., & Dodd, E. (2022). Remote sensing methods for detecting and mapping hailstorm damage: a case study from the 20 July 2020 hailstorm, Baragan Plain, Romania. *Natural Hazards*, 114(2), 2013–2040. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05457-x>
- Bell, J., Gebremichael, E., Molthan, A., Schultz, L., Meyer, F., Hain, C., Shrestha, S., & Payne, K. (2020). Complementing Optical Remote Sensing with Synthetic Aperture Radar Observations of Hail Damage Swaths to Agricultural Crops in the Central United States. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 59. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-19-0124.1>
- Bhogapurapu, N., Dey, S., Bhattacharya, A., Mandal, D., Lopez-Sanchez, J. M., McNairn, H., López-Martínez, C., & Rao, Y. S. (2021). Dual-polarimetric descriptors from Sentinel-1 GRD SAR data for crop growth assessment. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 178, 20–35. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.05.013>
- Dotzek, N., P. Groenemeijer, B. Feuerstein, A. M. H. (2009). Overview of ESSL's severe convective storms research using the European Severe Weather Database ESWD. *Atmospheric Research*, 93, 575–586.
- Furlanetto, J., Dal Ferro, N., Longo, M., Sartori, L., Polese, R., Caceffo, D., Nicoli, L., & Morari, F. (2023). LAI estimation through remotely sensed NDVI following hail defoliation in maize (*Zea mays* L.) using Sentinel-2 and UAV imagery. *Precision Agriculture*. <https://doi.org/10.1007/s11119-023-09993-9>
- Gössinger-Wieser, A., Balas, M. (2017). Klimawandelanpassungsstrategie Steiermark 2050. In *Land Steiermark – Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Abteilung 15 Energie, Wohnbau und Technik*. [https://www.umwelt.steiermark.at/cms/dokumente/11919303\\_125052026/76863340/2017-10-20\\_KWA-Strategie\\_Steiermark\\_2050\\_\(Web\).pdf](https://www.umwelt.steiermark.at/cms/dokumente/11919303_125052026/76863340/2017-10-20_KWA-Strategie_Steiermark_2050_(Web).pdf)
- Ha, T., Shen, Y., Duddu, H., Johnson, E., & Shirliffe, S. (2022). Quantifying Hail Damage in Crops Using Sentinel-2 Imagery. *Remote Sensing*, 14, 951. <https://doi.org/10.3390/rs14040951>
- Kim, Y., Jackson, T., Bindlish, R., Lee, H., & Hong, S. (2012). Radar Vegetation Index for Estimating the Vegetation Water Content of Rice and Soybean. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 9(4), 564–568. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2011.2174772>
- Kim, Y., & Zyl, J. J. (2009). A Time-Series Approach to Estimate Soil Moisture Using Polarimetric Radar Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(8), 2519–2527. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2014944>
- Laviola, S., Monte, G., Cattani, E., & Levizzani, V. (2022). Hail Climatology in the Mediterranean Basin Using the GPM Constellation (1999 - 2021). In *Remote Sensing* (Vol. 14, Issue 17). <https://doi.org/10.3390/rs14174320>
- Longo, M., Furlanetto, J., Dal Ferro, N., Caceffo, D., & Morari, F. (2022). Coupling process-based models and remote sensing data to predict yield loss by hail damage. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-4594>
- Mohr, S., & Kunz, M. (2013). Recent trends and variabilities of convective parameters relevant for hail events in Germany and Europe. *Atmospheric Research*, 123, 211–228. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.05.016>
- Österreichische Hagelversicherung VVaG. (2023). Hagelversicherung: Der Klimawandel kostet Existenzen - 105 Millionen Euro Schaden. Pressemitteilungen. <https://www.hagel.at/presseaussendungen/?t%5B%5D=schaden&y%5B%5D=2022>

Periasamy, S. (2018). Significance of dual polarimetric synthetic aperture radar in biomass retrieval: An attempt on Sentinel-1. *Remote Sensing of Environment*, 217, 537–549. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.09.003>

Rädler, A. T., Groenemeijer, P. H., Faust, E., Sausen, R., & Púčik, T. (2019). Frequency of severe thunderstorms across Europe expected to increase in the 21st century due to rising instability. *Npj Climate and Atmospheric Science*, 2(1), 30. <https://doi.org/10.1038/s41612-019-0083-7>

Sosa, L., Justel, A., & Molina, Í. (2021). Detection of Crop Hail Damage with a Machine Learning Algorithm Using Time Series of Remote Sensing Data. In *Agronomy* (Vol. 11, Issue 10). <https://doi.org/10.3390/agronomy111102078>

Villarroya-Carpio, A., Lopez-Sanchez, J. M., & Engdahl, M. E. (2022). Sentinel-1 interferometric coherence as a vegetation index for agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 280, 113208. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113208>