

Spätfröste aus meteorologischer Sicht

-Entstehungsmechanismen, Maßnahmenempfehlungen
Christian Kotremba, Institut für Agrarökologie, RLP AgroScience

Zusammenfassung

In den letzten Jahren ist der Obst- und Weinbaubau in Deutschland verstärkt durch Spätfröste im Frühjahr und dessen negative Folgen auf die Ertragsituation und Qualität betroffen gewesen. Insbesondere im April 2017 kam es deutschlandweit zu massiven Frostschäden im Obst- und Weinbau. Gründe hierfür lagen in einer bereits sehr weit fortgeschrittenen Vegetationsentwicklung in Folge eines überdurchschnittlich warmen Spätwinters und Frühjahrs. Ab dem 17. April 2017 bis in den Mai hinein wurde Deutschland dann im Zuge eines massiven Kaltlufteinbruchs aus dem Norden mit Polarluft überflutet. Die Tiefsttemperaturen sind deutlich in den Frostbereich gefallen, teils wurden nächtliche Minima von unter -7 °C in Obst- und Weinlagen verzeichnet. Dieser Kaltlufteinbruch führte zu extremen Spätfrostschäden. Das Schadbild zeigte sich im Vergleich zu vorherigen Spätfrostergebnissen in seiner räumlichen Verteilung deutlich heterogener. Selbst Lagen, welche bis dato noch nicht durch Spätfrostschäden in Mitleidenschaft gezogen wurden, zeigten diesmal Frostschäden. Gründe hierfür lagen in einer Kombination aus Advektiv- und Strahlungsfrösten. Neben den typischen Frostlagen in Mulden, Senken und Hangfußbereichen traf der Frost diesmal auch Hang- und Kuppenbereiche. Der folgende Beitrag behandelt daher das Thema Spätfröste in seiner gesamten Komplexität und geht hierbei auf die Entstehungsmechanismen von Kaltluft, der zeitlichen Entwicklung von Spätfrösten in Historie und Zukunft sowie exemplarischen Frostschutzmaßnahmen im Obst- und Weinbau ein.

Abstract

In recent years yield and quality of orcharding and viticulture were negatively affected by spring time late frost events in Germany. Massive frost damages in orcharding and viticulture occurred in all of Germany, especially in April 2017. A well advanced vegetation development, due to outstanding warm late winter and springtime temperatures, was responsible. Due to winterly winds from the North, Germany was floated by polar air during April, 17th until into May 2017. Lowest temperature dropped significantly below 0 °C and nightly minimum temperatures of -7 °C were recorded in orcharding and vineyard sites. These winterly winds from the North were responsible for extreme late frost damages. In comparison to previous late frost damages the spatial pattern of damages was considerably more heterogeneous. Even sites which had remained unaffected from late frost damages so far, were badly affected. Responsible therefore was a combination of advective and radiation frost. Beside typical frost locations like troughs, valleys and foot slope areas, this time even slope and hilltop areas were affected. The present study addresses the whole complexity of late frost events. Formation mechanism of cold air, temporal development of late frost in the past and future as well as exemplary frost protection methods in orcharding and viticulture will be discussed.

1) Methodische Grundlagen Kaltluftbildung

Zur Ausbildung von Spätfrösten im Frühjahr bedarf es einer Kombination vieler zusammenwirkender Faktoren. Mitteleuropa wird im Laufe des Jahres durch verschiedene Luftmassen beeinflusst. Für die Ausbildung einer Spätfrostlage stellt die Advektion von Polarluft das entscheidende Kriterium dar. Hierbei wird eine sehr kalte Luftmasse aus nördlichen Breiten nach Mitteleuropa herangeführt. Häufige Wetterlagen, welche in Mitteleuropa zu Spätfrösten führen, sind die Nordwest-, Nord- und Nordostlage bzw. in deren Anschluss die Ausbildung einer antizyklonalen Hochdruckwetterlage ohne definierbare Windrichtung. Kommt es im Anschluss zur Ausbildung von Strahlungs Nächten mit geringer Wolkenbedeckung ($< 3/8$) und geringen Windgeschwindigkeiten ($< 1,5$ m/sek), kann die Temperatur, selbst zu diesem späten jahreszeitlichen Zeitpunkt (April - Mai) unter die $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ -Grenze fallen. Es werden im allgemeinen Advektiv- von Strahlungsfrösten unterschieden, letztere treten hierbei deutlich häufiger auf und sind meist verantwortlich für Frostschädigungen im Wein- und Obstbau. In Strahlungs Nächten bildet sich, in Abhängigkeit zur jeweiligen Landnutzung, Kaltluft aus (typische Kaltluftproduzenten sind z.B. Freiflächen), welche in reliefiertem Gelände den Einsenkungen des Geländes als Leitlinien folgt. Kaltluft ist schwerer als ihre Umgebungsluft und fließt daher stets hangabwärts und sammelt sich in Senken, Mulden, Tälern und Hangfußbereichen. Diese Kaltluftammelgebiete stellen die (spät-) frostgefährdetsten Lagen im Gelände dar. Bei Advektivfrösten sind häufig auch höhere Hangbereiche und Kuppenlagen von Frost betroffen. Die Ausbildung von Kaltluft wird zusammenfassend durch folgende Faktoren bedingt: Kaltluftadvektion (Zustrom kalter Luftmassen aus dem Norden, Polarluft), Größe des Kaltlufteinzugsgebietes, Kaltluftepisode (Dauer der nächtlichen Kaltluftproduktion), Kaltluftproduktionsraten (abhängig von der Landnutzung), Landschaftsposition, umliegendes Relief, Hangneigung und die Nähe bzw. Höhe zu Abflussbahnen.

2) Geodatenbasierte Detektion besonders frostgefährdeter Standorte

Spätfrostgefährdete Lagen lassen sich räumlich sehr gut detektieren. Der aus einem Digitalen Geländemodell (DGM) gewonnene Reliefparameter „Höhe über Tiefenlinie“ eignet sich hierzu besonders gut. Er beschreibt die Höhe eines Standortes über dessen zugehöriger Tiefenlinie (Talgrund) (siehe Köthe & Lehmeier 1993; Friedrich 1996). Hierbei wird eine Abflusssimulation mittels DGM im Geoinformationssystem (GIS) durchgeführt. Ab einem definierten Schwellenwert der beitragenden Fläche wird eine Tiefenlinie ausgewiesen (z.B. Schwellenwert zur Ausbildung von Auen bzw. auenähnlichen Bereichen, siehe: Behrens & Scholten, 2002). Frostgefährdete Lagen befinden sich meist < 3 m Höhe zur Tiefenlinie. Bei Kartierungen in der Südpfalz konnte dieser Wert als Schwellenwert für auftretende Frostschäden definiert werden (siehe: Kotremba & Trapp 2016, Kotremba et al. 2015) (vgl. Abb. 1).

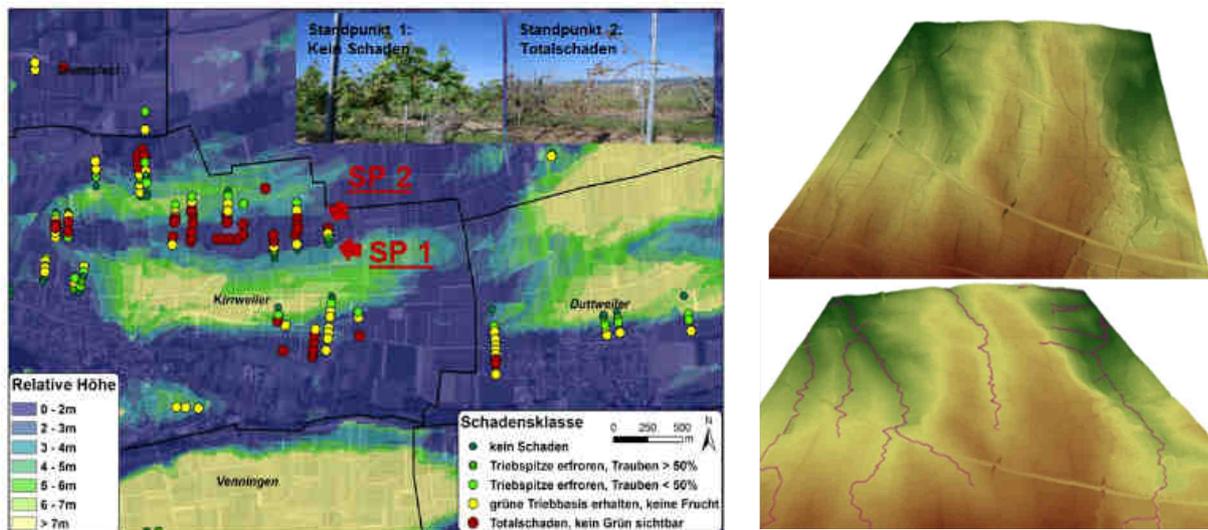


Abb. 1: Abhängigkeit kartierter Spätfrostschadensklassen an Weinreben zur Höhe über Tiefenlinie (Südpfalz), Spätfrostkartierung in Kooperation mit dem DLR Rheinpfalz, Mai 2011 (linke Abbildung) & DGM-basierte Tiefenlinien eines 6-fach überhöhten 3D-Geländes (Südpfalz) (rechte Abbildungen), Datengrundlage: LVermGeo RLP

3) Spätfröste in ihrer historischen Entwicklung

Die jeweiligen Kulturarten weisen in ihrer phänologischen Entwicklung unterschiedliche kritische Temperaturschwellenwerte bzgl. Frostschäden auf. Nach dem Knospenaustrieb sind Obst- und Weinbaukulturen besonders empfindlich gegenüber Frosteinwirkung. Der kritische Schwellenwert liegt dann meist nur knapp unter 0 °C. Bereits bei Lufttemperaturen < - 1,5 °C kann es im Obst- und Weinbau zu schweren Schädigungen der noch jungen Pflanzenteile kommen. Spätfröste müssen daher bei deren Betrachtung immer in Bezug zum Entwicklungsstand der jeweiligen Kultur gesetzt werden. Der Vegetationsbeginn kann durch verschiedene Methoden berechnet werden. Meist werden Wärmesummen errechnet, wie z.B. bei den Wachstumsgradtagen (WGT) oder der Grünlandtemperatursumme 200 (GTS 200). Bei der GTS 200 werden alle Temperaturmittelwerte ab Anfang Januar addiert und mit einem monatspezifischen Faktor multipliziert bis der Wert 200 erreicht wird. In Trier-Petrisberg (265 m) liegt der Vegetationsbeginn z.B. im Zeitraum 1955 - 2016 bei Tag 81 (20. März) im Jahr. Es zeigt sich insbesondere in den letzten 20 Jahren eine häufige Verfrühung des Vegetationsbeginns, welche durch den rezenten Klimawandel mit höheren Temperaturen im Winter und Frühjahr induziert wird. Hierdurch verlängert sich der Zeitraum, in welchem potentiell Spätfröste auftreten können. Ein signifikanter Trendanstieg dieser Ereignisse konnte in den durchgeführten statistischen Analysen nicht nachgewiesen werden. Es zeigt sich jedoch ein schwach positiver Trend in den letzten 10 Jahren. Für den betrachteten Zeitraum zeigt sich ein stetiges zeitliches Wechselspiel zwischen letztem Frost im Jahr und Knospenaustrieb. Immer wieder liegen diese beiden Ereignisse zeitlich eng beieinander, in vereinzelt Jahren (z.B. 2011, 2016 und 2017) liegt der Zeitpunkt des letzten Frostes zeitlich nach dem Knospenaustrieb, was verheerende Folgen für die frostempfindlichen Obst- und Weinkulturen bedeuten kann (siehe Abb. 2).

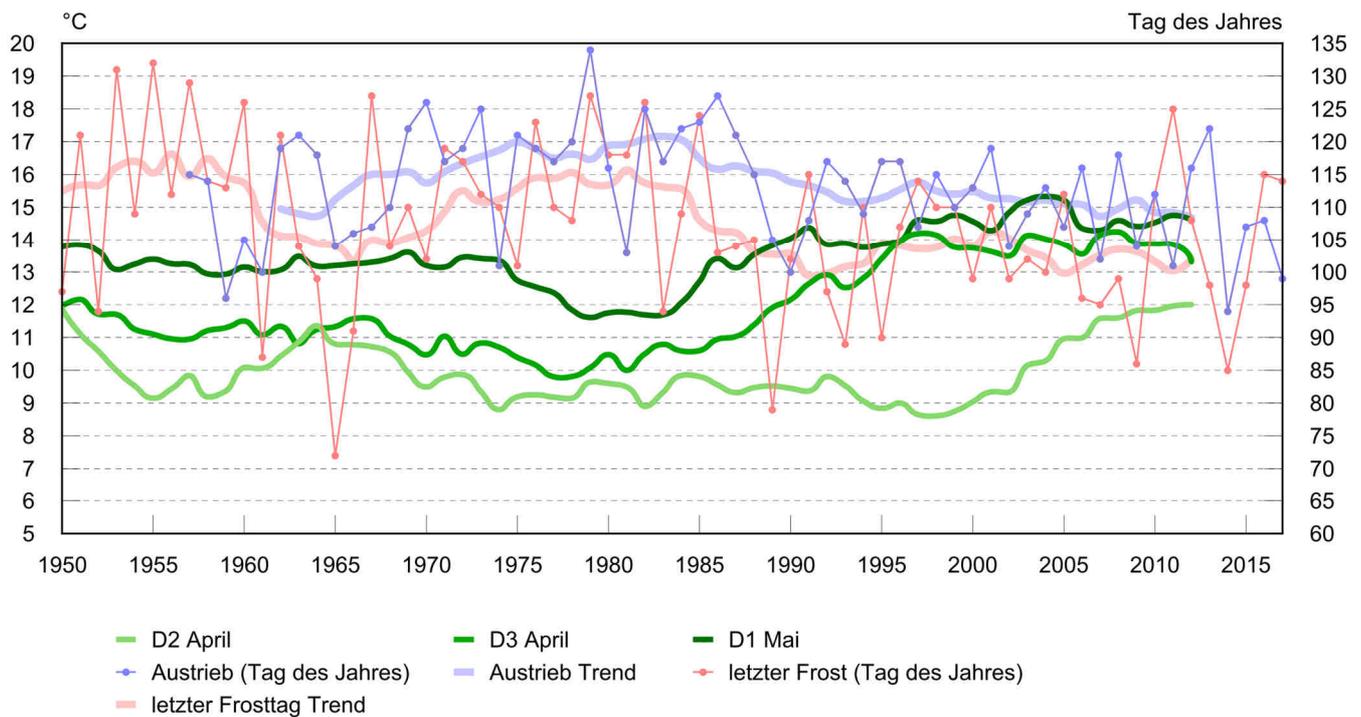


Abb. 2:

Trend der Dekadenmittelwerte der Lufttemperatur und Zeitpunkt des letzten Frostitages der Klimareihe 1950 - 2017 sowie Austrieb der Rieslingrebe in Neustadt (Weinstraße) 1957 - 2017 (Datenquelle: Deutscher Wetterdienst (DWD), Daten bearbeitet – Klimastationen Mannheim (kompiliert und homogenisiert auf Freilandstandort) & DLR Rheinpfalz. In: Pollichia-Kurier 33 (3) – 2017, Grafik: W. Lähne)

4) Maßnahmenempfehlungen

Im Bereich Kern- und Steinobst kommen verschiedene Frostschutzmaßnahmen zum Einsatz, welche im Folgenden kurz beschrieben werden sollen.

- Überkronenberegnung:** Die in Deutschland am häufigsten genutzte und gleichzeitig effizienteste Frostschutzmaßnahme ist die Überkronenberegnung. Hierbei werden die Obstbäume mithilfe von Regnern in kurzen Intervallen benetzt. Das Prinzip beruht auf der Energiefreisetzung beim Phasenwechsel von Wasser zu Eis. Dieser Vorgang setzt latente Wärme frei (80 Kalorien latente Wärmeenergie je Gramm Wasser). Die Effekte werden in einen direkten und einen indirekten Effekt unterschieden. Ein Teil der Erstarrungswärme wird zum einen direkt über den Eispanzer an die Blütenorgane weitergeleitet, die Temperatur pendelt sich hierbei auf etwa $-0,5\text{ °C}$ unter dem Eispanzer ein und liegt damit über dem kritischen Schwellenwert für Frostschäden. Ein anderer Teil wird nach außen abgegeben. Durch diese Konvektion kann (indirekt) eine Temperaturerhöhung von bis zu 2 °C in der gesamten beregneten Obstanlage erreicht werden. Für Steinobst ist diese Maßnahme hingegen, aufgrund der Beeinträchtigung der Befruchtung, nicht geeignet (vgl. Baab et al. 2016).
- Unterkronenberegnung:** Die Unterkronenberegnung ist nicht so verbreitet, wie die Überkronenberegnung und wird verstärkt im Steinobst als Frostschutzmaßnahme eingesetzt. Das Wirkprinzip ist das Gleiche wie bei der Überkronenberegnung, nur wird nicht der Baum an sich vereist, sondern Gras und Schnittholz am Boden. Die dabei entstehende Wärme steigt konvektiv auf und wärmt die Obstanlage. Die Frostschutzwirkung ist dabei abhängig von der zugeführten Wassermenge, Luftfeuchtigkeit und Wind in der Anlage. Mit zunehmender Höhe verringert sich der Frostschutz bei dieser Methode. Praxisversuche in 2007 konnten einen positiven Effekt

von 1,5 °C (Ø 0,5 °C) Anstieg der Lufttemperatur und bis zu 1,7 °C (Ø 0,9 °C) Anstieg der Knospentemperatur gegenüber einer nicht berechneten Kontrollparzelle feststellen. Auch die erfassten Schäden lagen in der berechneten Anlage (1,5 %) deutlich unter denen der Kontrolle (10,7 %) (vgl. Baab et al. 2016).

- **Anti-Frost-Kerzen:** Diese Frostschutzmaßnahme führt zu einer Erhöhung der Umgebungstemperatur durch Verbrennen von Paraffinwachs. STOPGEL Kerzen erreichen laut Vertreiber (ROSARIO & PRANGE GBR) einen Wirkungsgrad von bis zu 50 m². Die Anzahl der Kerzen richtet sich prinzipiell nach der Temperatur in der Obstanlage. Bei einem Schutz bis einer Temperatur von -2 °C würden demnach pro Hektar 200 Kerzen, bei einem Schutz bis einer Temperatur von -7 °C bis zu 500 Kerzen als Frostschutz benötigt. Nachteil der Methode ist der sehr hohe Arbeitsaufwand und die anfallenden Kosten (pro Hektar ca. 2.000 – 5.000 €). Praxisversuche zeigten positive Effekte. In unmittelbarer Nähe zu den Kerzen konnte meist eine deutliche Temperaturerhöhung nachgewiesen werden (vgl. Rosario & Prange GbR).
- **Selective inverted sinks:** Selective inverted sinks saugen bodennahe Kaltluft an und blasen diese bis in eine Höhe von ca. 90 m aus. Wärmere Luft soll aus höher gelegenen Luftschichten nachfließen und zu einer Temperaturerhöhung in der Senke führen. Bevorzugte Einsatzorte dieser Methode sind ausgewiesene Kaltluftsammlgebiete und Kaltluftseen in Senken und Mulden. Durch eine Maschine werden im Mittel 2 - 4 ha Fläche abgedeckt. Die positiven Effekte gehen mit zunehmender Entfernung zur SIS deutlich zurück (max. Reichweite bis 500 m), vgl. Internet: <http://exfrostprotection.com/whatissis.html> (30.11.2017).
- **Frostguard:** Der Frostguard (siehe Abb. 3 rechts) ist ein stationäres Heizgerät, welches sich um die eigene Achse dreht und hierbei warme Luft verströmt. Das Gerät kann eine Fläche von 0,3 - 0,5 ha abdecken. In Versuchen am Campus Klein-Altendorf im April 2014 konnten positive Effekte bis in eine Reichweite von 40 m nachgewiesen werden. Die Vorteile des Geräts liegen in einer komfortablen Methode zum Frostschutz. Die Nachteile sind die Kostenseite (Anschaffungskosten: ca. 20.000 € pro Hektar, Kosten pro Gerät: 6.800 €, Abdeckung 0,3 – 0,5 ha) und der geringe effektive Frostschutz (vgl. Baab et al. 2016).
- **Frostbuster:** Der Frostbuster ist eine per Traktor gezogene Maschine, die nach vergleichbarem Prinzip arbeitet wie der Frostguard. Durch einen Gasbrenner erwärmt sich die Luft und wird beidseitig aus dem Gerät geblasen (Reichweite: ca. 50 m) und erwärmt so die Obstanlage. Laut Hersteller können durch die Maschine bis zu 8 ha frostfrei gehalten werden. Die Anschaffungskosten pro Maschine liegen bei ca. 15.500 €. Der Frostbuster kann insbesondere zum Frostschutz bei leichten Frösten eingesetzt werden (vgl. Baab et al. 2016).
- **Hubschrauberbefliegungen:** Im Weinbau finden derzeit weitere Frostschutzmethoden Anwendung. In Ruppertsberg (Pfalz) wurden z.B. durch das DLR Rheinpfalz am 20.04.2017 Hubschrauber erfolgreich zur Frostbekämpfung eingesetzt (vgl. Abb. 3 links). Die Maßnahme begründet sich in der Verwirbelung von kalter bodennaher Luft mit wärmerer Luft in höheren Luftschichten. Vorteil der Methode liegt in einer vergleichsweise großen Flächenabdeckung (15 - 20 ha zusammenhängende Fläche pro Hubschrauber). Die Nachteile liegen in der kostenintensiven Methode, der begrenzten Verfügbarkeit und der Starterlaubnis erst nach Sonnenaufgang, so dass nächtliche Fröste hierdurch nicht bekämpft werden können.
- **Frostschutzrotatoren:** Auch Frostschutzrotatoren (Windmaschinen) nutzen die Effekte der Luftverwirbelung kalter, bodennaher und wärmerer Luft in der Höhe (hier: 10 - 12 m). Typische Standorte stellen Kaltluftsenken mit häufigen Frostereignissen dar. Die Windmaschinen decken eine Fläche von ca. 5 ha ab. Die Kosten liegen pro Maschine bei über 30.000 €. Die Vorteile sind im einmaligen Aufbau, Installation und der

Programmierung zu sehen. Der eigentliche Frostschutzprozess läuft anschließend vollautomatisiert ab. Es fallen, anders als bei anderen Methoden, keine ereignisbezogenen Mehrarbeiten an. Hierdurch entstehen auf längere Sicht Kostenvorteile gegenüber anderen Maßnahmen. Die Nachteile der Methode liegen in der Lautstärke, den hohen einmaligen Kosten bei der Anschaffung und der verhältnismäßig geringen Flächenabdeckung. In Praxisversuchen in Neustadt-Duttweiler (Pfalz) konnte das DLR Rheinpfalz mit Hubschrauberbefliegungen sehr positive Effekte (Temperaturerhöhung) erzielen.



Abb. 3:
Hubschrauberbefliegung in Ruppertsberg (20.04.2017) (links) und Frostguard (rechts) als Frostschutzbekämpfung im Wein- und Obstbau, Quelle: DLR Rheinpfalz & Internet: <http://www.agrofrost.eu/index.php/en/products/frostguard> (30.11.2017)

5) Zusammenfassung und Ausblick

Spätfröste benötigen für ihr Auftreten bestimmte meteorologische und geomorphologische Voraussetzungen. Sie treten im Frühjahr nach dem Knospenaustrieb auf. Die kritischen Temperaturen für Pflanzenschäden liegen dann nur knapp unter dem Gefrierpunkt (ca. - 1,5 °C). Typische Frostlagen sind Senken, Mulden und Täler, in denen sich die hangabwärts fließende Kaltluft in Strahlungs Nächten sammelt. Diese Standorte lassen sich im GIS über DGM-basierte Ableitungen (bspw. Höhe über Tiefenlinie) räumlich detektieren. Spätfröste sind in den letzten Jahren verstärkt in das mediale Interesse gerückt, zeigen aber in Zeitreihenanalysen keinen statistisch signifikanten Trend einer Zunahme, trotz früher stattfindendem Vegetationsbeginn. Durch geeignete Maßnahmen können Schäden in Frostnächten vermindert bzw. vermieden werden. Die jeweils passende Frostschutzmaßnahme sollte hierbei individuell an die lokalen klimatischen und geomorphologischen Gegebenheiten angepasst werden. Als besonders effektiv zeigten sich in Versuchen Überkronen- und Unterkronenberegnungen sowie Luftverwirbelungsmethoden mittels Windmaschinen und Hubschrauberbefliegungen. Stationäre und mobile Heizgeräte, wie Anti-Frost-Kerzen, Frostbuster und Frostguard können ebenfalls Frostschäden minimieren, sind aber meist weniger effektiv und eher im Bereich leichter Fröste einsetzbar.

Für die Zukunft ist eine gesicherte Aussage zur Eintrittswahrscheinlichkeit von Spätfrösten schwierig. Spätfröste stellen Extremereignisse dar, welche über Klimamodelle nicht oder nur unzulänglich abgebildet werden können. Sie sind das Resultat vieler zusammenwirkender, meist kleinräumiger Prozesse. Die Grundvoraussetzung für das Eintreten von Spätfrösten sind nordische Luftmassen (Polarluft), welche nach Mitteleuropa einfließen. Über klimamodellspezifische Luftmassenbetrachtungen kann eine Abschätzung zum zukünftigen Spätfrostpotential erfolgen. Hierbei könnten Trendentwicklungen von

potentiell spätfrostauslösenden Nordwest-, Nord- oder Nordost- Wetterlagen in den Monaten April - Mai ausgewertet werden. Diese Fragestellungen werden zukünftig sicherlich verstärkt im Fokus des Klimawandelmonitorings untersucht.

Literatur

Agroforst NV (2017): agroforst nv. The ultimate form of frost protection. Internet: <http://www.agrofrost.eu/index.php/en/products/frostguard> (30.11.2017)

Ausvat Pty Ltd (2017): exfrost. SIS frost protection solutions. Internet: <http://exfrostprotection.com/whatissis.html> (30.11.2017)

Baab, G., Klophaus, L., Kunz, A., Baumann, F. (2016): Bekämpfung von Spätfrösten.

Behrens, T. & Scholten, T. (2002): DGMK²⁰⁺. Erstellung der Digitalen Geomorphographischen Karte für das Bundesland Rheinland-Pfalz im Maßstabsbereich 1:25.000 bis 1:50.000.

Friedrich, K. (1996): Digitale Reliefgliederungsverfahren zur Ableitung bodenkundlich relevanter Flächeneinheiten. Frankfurter Geowissenschaftliche Arbeiten, Serie D – Band 21. Dissertation, Frankfurt.

Köthe, R. & Lehmeier, F. (1993): SARA – Ein System zur automatisierten Relief-Analyse. Zeitschrift für Angewandte Geographie (4), 11 - 21.

Kotremba, C. (2015): Spätfrostgefährdung des Weinanbaugebiets Pfalz – eine klimatologische und reliefbasierte Betrachtung. In: Deutsches Weinbau Jahrbuch 2015; S. 19-28.

Kotremba, C. & Trapp, M. (2016): Hochauflösende Geländedaten zur Flächencharakterisierung rheinland-pfälzischer Weinbauflächen – Praxisbezogene Anwendungsbeispiele -. In: Deutsches Weinbau Jahrbuch 2016. S. 102-112.

Lähne, W. (2017): Die Spätfrostereignisse zwischen dem 19. April und 10. Mai 2017 aus klimatologischer Sicht. In: Pollichia-Kurier 33 (3) – 2017.

Rosario & Prange GbR (2017): STOPGEL ANTI-FROST WEICHWACHS KERZEN. Internet: <https://www.weinberg-shop.de/stopgel/> (30.11.2017)