



Bundesanstalt für  
Landwirtschaft und Ernährung



Bundesinformationszentrum  
Landwirtschaft

# Agrarmeteorologie



Liebe Leserinnen und Leser,

neben den Produktionsfaktoren Boden, Arbeit und Kapital werden für die landwirtschaftliche Erzeugung das Klima, die Witterung und das Wetter immer bedeutender.

Das Klima eines Standortes ist die Gesamtheit aller Wetterzustände über einen längeren Zeitraum (min.30 Jahre). Für die Ertragsfähigkeit eines Standortes ist es sehr bedeutend.

Die Witterung beschreibt den vorherrschenden Charakter des Wetterablaufes über einen bestimmten Zeitraum, in der Regel über einige Tage. Bei der betrieblichen Einsatzplanung kommt der mittelfristigen Witterungsprognose eine immer größere Bedeutung zu.

Das Wetter, also der aktuelle Zustand der Atmosphäre am jeweiligen Standort, hat direkten Einfluss auf die Pflanzen und bestimmt maßgeblich ihre Entwicklung. Extreme Wetterlagen wie Dürre, Hagel, Sturm, Frost oder Dauerregen können der Landwirtschaft binnen Stunden, Tagen oder wenigen Wochen erheblichen Schaden zufügen.

Im Pflanzenbau sind bereits vor der Aussaat von Feldfrüchten genaue Kenntnisse des Bodenzustandes sowie der Befahrbarkeit zur Vermeidung von Schadverdichtungen erforderlich. Für die landwirtschaftliche Praxis sind tagesaktuelle Information zur voraussichtlichen Wetterentwicklung, insbesondere Niederschlag und Verdunstung, elementar: sowohl für die Bestellung wie auch für Pflanzenschutzmaßnahmen und Düngung nach guter fachlicher Praxis und nicht zuletzt auch für die Ernteplanung.

Die Agrarmeteorologie liefert somit einen unmittelbaren Nutzen, der sowohl den landwirtschaftlichen Produzenten als auch der Umwelt zugutekommt.

Die vorliegende Broschüre verdeutlicht die Bedeutung von Klima und Wetter für die landwirtschaftliche Produktion, eines breiten Spektrums an Kulturpflanzen. Sie zeigt auch, welche Leistungen des Deutschen Wetterdienstes für die landwirtschaftliche Praxis bereitgestellt werden.

Der Schwerpunkt liegt in der Dokumentation von agrarmeteorologischen Modellen und Verfahren in der Anwendung für verschiedene ackerbauliche Kulturen sowie Grünland, Gemüse-, Obst- und Weinbau. Die Broschüre richtet sich an Studierende sowie Berater im Agrarbereich und andere Interessierte. Sie kann auch in der Ausbildung und in der landwirtschaftlichen Praxis eingesetzt werden.

Ihre  
Redaktion Landwirtschaft  
Bundesinformationszentrum Landwirtschaft



**Bundesinformationszentrum  
Landwirtschaft**

<b>1. Einleitung</b> .....	<b>4</b>	6.4.1 Anbauvoraussetzungen und Aussaatbedingungen.....	83
<b>2. Klimatische Rahmenbedingungen und beobachtete Veränderungen</b> .....	<b>7</b>	6.4.2 Pflanzenkrankheiten und Schädlinge.....	87
2.1 Niederschlag.....	8	6.4.3 Besonderheiten bei der Ernte.....	89
2.2 Temperatur.....	12	<b>6.5 Grünland</b> .....	90
2.3 Verdunstung und Bodenfeuchte.....	14	6.5.1 Vegetationsbeginn.....	91
2.4 Boden.....	17	6.5.2 Ertragsbildung und Qualitätsentwicklung.....	92
2.5 Phänologie.....	18	6.5.3 Welkevorgang.....	97
<b>3. Agrarmeteorologische Kernparameter – ihre Bedeutung und Messung</b> .....	<b>23</b>	6.5.4 Ausblick.....	97
3.1 Bodentemperatur und Frosteindringtiefe.....	24	<b>6.6 Gemüsebau</b> .....	98
3.2 Bodenfeuchte.....	26	6.6.1 Bewässerungssteuerung.....	98
3.3 Verdunstung.....	28	6.6.2 Folienmanagement.....	104
3.4 Tau.....	30	6.6.3 Pilzliche Erkrankungen.....	105
3.5 Blattbenetzung.....	31	<b>6.7 Obstbau</b> .....	108
<b>4. Grundlegende agrarmeteorologische Modelle</b> .....	<b>34</b>	6.7.1 Pflanzenentwicklung: Phänologie als Klimaindikator beim Apfel.....	108
4.1 Wachstumsmodelle.....	35	6.7.2 Kälte- und Wärmebedarf von Obstgehölzen.....	110
4.1.1 Phänologische Beobachtungen.....	35	6.7.3 Frostrisiko und Frostwarnung.....	114
4.1.2 Temperatursummen.....	36	6.7.4 Pflanzenkrankheiten: Apfelschorf.....	116
4.2 Stickstoffdynamik und Düngung.....	38	<b>6.8 Weinbau</b> .....	119
4.3 Ertragsmodelle.....	41	6.8.1 Bestandsklima.....	119
4.4 Bestandesklimamodelle.....	43	6.8.2 Blattflächenmodell.....	120
4.5 Verwendung und Einsatz agrarmeteorologischer Modelle.....	46	6.8.3 Blattnässemodell.....	123
<b>5. Gelände- und Bestandsklima</b> .....	<b>47</b>	6.8.4 Pilzliche Erkrankungen.....	123
5.1 Auswirkungen von Boden- und Geländeklima auf die landwirtschaftliche Pflanzenproduktion.....	48	6.8.5 Tierische Schaderreger.....	133
5.1.1 Nachteil von Senken: Kaltluftseen.....	48	6.8.6 Weinbauliche Beratung.....	134
5.1.2 Vorteil von Hanglagen: Wärmegunst.....	48	<b>7. Beobachtungs- und Vorhersagefähigkeiten</b> .....	<b>141</b>
5.2 Feldtechnische Beeinflussung des Mikroklimas.....	49	7.1 Wetterbeobachtungen.....	142
5.2.1 Mikroklimatischer Wärmegewinn durch Folien- und Vliesabdeckungen.....	50	7.2 Vorhersagen für die nächsten Minuten bis wenige Stunden(Nowcasting).....	143
5.2.2 Frostabwehr.....	51	7.3 Numerische Wettervorhersage (NWV).....	143
5.3 Wechselseitige Effekte von Windparks und Geländeklima.....	52	7.4 Vorhersage auf saisonalen und dekadischen Skalen und Klimaprojektion.....	146
5.3.1 Auswirkungen von Windkraftanlagen auf das Geländeklima.....	52	7.4.1 Von den Anfangs- zu den Randbedingungen.....	146
5.3.2 Auswirkungen des Kulturpflanzenanbaus auf die Energieausbeute.....	53	7.4.2 Forschung und Anwendung der Klimavorhersagen.....	146
5.4 Auswirkungen von Flüssen/Kanälen/Seen als potenzielle Wetterscheiden auf das regionale Klima.....	54	7.5 Vorhersagefehler und Unsicherheitsabschätzung.....	146
5.5 Biologische Rückkoppelungseffekte auf das Regionalklima.....	54	7.6 Qualität der Vorhersageprodukte.....	147
5.5.1 Einfluss von Schaderregern.....	54	7.7 Aktuelle Güte der Langfristprognosen.....	149
5.5.2 Einfluss landwirtschaftlicher Landnutzungsänderungen.....	54	7.7.1 Güte der Jahreszeitenvorhersage.....	149
5.5.3 Einfluss durch Feldberegnung.....	55	7.7.2 Dekadische Vorhersagen.....	149
<b>6. Agrarmeteorologische Modelle und Verfahren in der Anwendung</b> .....	<b>58</b>	7.7.3 Klimaprojektionen.....	149
<b>6.1 Getreide</b> .....	<b>59</b>	<b>8. Agrarmeteorologische Beratung für die Politik</b> .....	<b>151</b>
6.1.1 Phänologische Entwicklung.....	60	8.1 Entscheidungsgrundlagen und Mithilfe bei gesetzlichen Regelwerken.....	152
6.1.2 Standortansprüche.....	60	8.2 Klimaatlas.....	154
6.1.3 Ertrag.....	64	8.3 Extreme Witterungssituationen in der Landwirtschaft.....	155
6.1.4 Qualitätseigenschaften des Ernteguts.....	66	8.3.1 Ad-hoc-Hilfen.....	155
<b>6.2 Mais</b> .....	<b>70</b>	8.3.2 Erosion durch Wind.....	155
6.2.1 Klimatische Bedingungen.....	70	8.4 Forschungsprojekte zur Klimafolgenabschätzung.....	156
6.2.2 Tierische Schaderreger.....	75	8.4.1 Verbundforschungsprojekt „Agrarrelevante Extremwetterlagen und Möglichkeiten von Risikomanagementsystemen“.....	156
6.2.3 Pilzliche Schaderreger.....	76	8.4.2 Weitere Forschungsprojekte.....	158
6.2.4 Modelle.....	76	8.5 Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS).....	159
<b>6.3 Winterraps</b> .....	<b>78</b>	8.6 Zusammenfassung.....	160
6.3.1 Tierische Schädlinge.....	81	<b>9. Ausblick</b> .....	<b>161</b>
6.3.2 Pilzliche Erkrankungen.....	83	<b>Glossar</b> .....	<b>165</b>
<b>6.4 Kartoffeln</b> .....	<b>83</b>	<b>Autoren</b> .....	<b>168</b>
		<b>Medien</b> .....	<b>177</b>
		<b>Impressum</b> .....	<b>183</b>



# 1 Einleitung

## Die Bedeutung von Wetterdaten für die Landwirtschaft

*Autoren: Hubert Honecker, Ute Schultheiß, Udo Busch, Dirk Engelbart*

In der Landwirtschaft sind nicht nur die drei volkswirtschaftlich bedeutsamen Produktionsfaktoren **Boden, Arbeit** und **Kapital** entscheidend. Für die landwirtschaftliche Erzeugung kommen als weitere wichtige Faktoren **Klima, Witterung und Wetter** hinzu, die für einen jeweiligen Standort wertbestimmend sind.

Das Klima eines Standortes ist die Gesamtheit möglicher Wetterzustände mit ihren tages- und jahreszeitlichen Schwankungen. Es beschreibt den mittleren Zustand der Atmosphäre über einen längeren Zeitraum, z. B. über 30 – 40 Jahre. Somit ist der für die Ertragsfähigkeit eines Standortes so wichtige Produktionsfaktor Klima durch den Menschen (mittelfristig) nicht beeinflussbar.

Das Klima hat besondere Bedeutung für die Bodenfruchtbarkeit eines Standortes. Aus diesem Grunde fließen Klimaelemente (Temperatur, Luftfeuchte, Wind, Niederschlag, Luftdruck, Bewölkung) und Klimafaktoren (geografische Breite, Orografie des Geländes, Art der Vegetation, Seehöhe etc.) bei der Bewertung eines Standortes nach dem Bodenschätzungsgesetz (2008) in die Bodenwertzahl ein.

Die Klimabedingungen sind mitbestimmend dafür, ob ein Standort als Acker- oder Grünland genutzt werden kann und somit auch, welche Kulturarten sich für den Anbau anbieten und welche Erträge und Qualitäten erzielt werden können. Der Landwirt muss das Klima an dem Standort, an dem er wirtschaftet, akzeptieren. So wird z. B. die Anbauentscheidung eines Landwirtes von dem regelmäßigen Auftreten von Sommertrockenheit an einem Standort stark beeinflusst. Dies gilt sowohl in der Pflanzenproduktion, als auch in der Tierhaltung. Seine täglichen Bewirtschaftungsmaßnahmen muss er hingegen auf den aktuellen Wetterverlauf und das mittelfristige Witterungsgeschehen ausrichten.

Aktuelle Maßnahmen, die im Zusammenhang mit der Bestellung von landwirtschaftlichen Flächen durchzuführen sind, orientieren sich an dem zu erwartenden Wetterverlauf und der Witterung. Das Wetter beschreibt den Zustand der Atmosphäre für einen bestimmten Ort zu einem bestimmten Zeitpunkt und wird durch die oben genannten Klimaelemente und -faktoren charakterisiert.

Die Witterung beschreibt den vorherrschenden Charakter des Wetterablaufes über einen bestimmten Zeitraum, in der Regel von einigen Tagen und bestimmt den auch von der Schlaggröße und der Bearbeitungsintensität abhängigen, unternehmerischen Planungsaufwand und dessen technische Umsetzbarkeit.

Bei zunehmenden Flächengrößen und dem Zwang zu möglichst genauer betrieblicher Einsatzplanung kommt der mittelfristigen Witterungsprognose eine immer größere Bedeutung zu.

Die landwirtschaftliche Produktion im Pflanzenbau und auch in der Tierhaltung ist unmittelbar abhängig von den jeweiligen Witterungs- und Wetterereignissen:

- » Witterungs- und Wettersituationen entscheiden darüber, welche Feldarbeiten erfolgen können. Tierhaltende Betriebe stimmen den Weidegang oder die Wirtschaftsdüngerausbringung darauf ab. Das Wetter am jeweiligen Standort nimmt Einfluss auf Saat- und Erntezeitpunkte und trägt wesentlich zur Ertragssituation in den Betrieben bei. Dabei kann die Pflanzenproduktion nur bis zu einem gewissen Grad mittels technischer Hilfsmittel wie z. B. Beregnung, Pflanzenschutz, organische und mineralische Düngung, Bodenbearbeitung etc. weiter optimiert werden. Extreme Wetterlagen wie Dürre, Hagel, Sturm, Frost oder Dauerregen können der Landwirtschaft binnen Stunden, Tagen oder wenigen Wochen erheblichen Schaden zufügen.
- » Im Pflanzenbau sind bereits vor der Aussaat von Feldfrüchten genaue Kenntnisse des Bodenzustandes, insbesondere der Befahrbarkeit zur Vermeidung von Schadverdichtungen, erforderlich. Neben unbedingt notwendigen Feldbegehungen sind dazu zeitnahe und tagesaktuelle Information zum Bodenfeuchteverlauf und der voraussichtlichen Wetterentwicklung, insbesondere Niederschlag und Verdunstung, elementar für die Bestellung nach guter fachlicher Praxis. Dies gilt für sämtliche Bewirtschaftungsmaßnahmen im Feld und auf dem Grünland.

Vorhersagen der agrarmeteorologischen Bedingungen sind auch entscheidend für die Erntearbeiten, denn hierbei sind die Landwirte vor Ort direkt von dem Wetterverlauf – oder in Abhängigkeit von der zu bewirtschaftenden Flächengröße – von den Vorhersagen für mehrere Tage abhängig. Dies gilt im Besonderen z. B. für die Getreide- und Hackfruchternte, die Heuwerbung und Silagebereitung sowie die Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln. Mit Hilfe von agrarmeteorologischen Modellen ist es möglich, den besten Zeitpunkt für die Heuernte, die Silagebereitung oder die Getreideabreife in Abhängigkeit von der Witterung zu bestimmen und die Arbeitsabläufe darauf einzustellen. In diese Modelle fließen Informationen zur Luftfeuchte und deren voraussichtlicher Entwicklung in Verbindung mit der vorhergesagten Windstärke ein, um für die Praxis abschätzen

zu können, wie sich der Ausgangszustand eines feuchten Bodens oder eines in der Abreife befindlichen Getreidebestandes im Zeitverlauf entwickeln kann.

Je später im Jahr einzelne Kulturen geerntet werden, z. B. im Herbst, Kartoffeln, Zuckerrüben, Mais, Feldgemüse, desto wichtiger sind längerfristige Prognosen der Bodenfeuchte als Indiz für die Befahrbarkeit des Bodens. Gemäß Bundesbodenschutzgesetz sind Bodenschadverdichtungen zu vermeiden. Daher muss z. B. die Wassersättigung eines Bodens bekannt sein, um abschätzen zu können, ob ein Boden befahrbar ist, ohne dass Druckschäden doppelt entstehen. Neben einer Beurteilung des Bodenzustandes (z. B. durch eine Spatendiagnose) kann in der täglichen Praxis hierfür auch die Berechnung der Bodenfeuchte des DWD verwendet und annäherungsweise abgeschätzt werden. Dies bietet den Vorteil, dass eine Prognose für die nächsten Tage vorliegt und der Arbeitsinsatz der Erntemaschinen optimiert werden kann. So hilft die Kenntnis des Bodenfeuchteverlaufes auch, ordnungsrechtliche Vorschriften, namentlich im Bereich der Düngung und der Bodenbearbeitung, einzuhalten.

Das Düngerecht schreibt seit 2006 vor, dass auf überschwemmten, wassergesättigten, schneebedeckten und gefrorenen Böden nicht gedüngt werden darf. Um Landwirten in diesem Zusammenhang eine Entscheidungshilfe zu geben, sind Daten notwendig, die erkennen lassen, wie ausgehend vom Wetter der letzten Tage und Wochen z. B. die Ausgangssituation im Boden bis etwa 60 cm Tiefe beurteilt werden kann. So ist wichtig, ob der Bodenfrost der frühen Morgenstunden tagsüber sicher auftaut und man folglich die durch Frosteinwirkung verdichtungsarme Befahrbarkeit der Böden zur Düngerausbringung ausnutzen kann. Ein Boden gilt dann als gefroren, wenn an einer Stelle der Frost mehr als 10 cm tief in den Boden eingedrungen ist und im Verlauf des Tages nicht oberflächlich auftaut. Eine Düngung auf Böden, in die der Frost mehr als 10 cm tief eingedrungen ist, ist nur dann zulässig, wenn diese tagsüber oberflächlich auftauen. Hierzu steht eine aktualisierte Bodenfrostvorhersage für den aktuellen und den Folgetag beim Deutschen Wetterdienst zur Verfügung.

Andererseits können agrarmeteorologische Daten über den Temperaturverlauf im Boden im Nachgang zu einer erfolgten Düngung zeigen, dass Bedingungen vorlagen, die den gesetzlichen Anforderungen und einer guten fachlichen Praxis entsprochen haben. Verstöße gegen die Vorschriften der Düngeverordnung können nach Fachrecht als Ordnungswidrigkeiten (OWI) mit einem Bußgeld geahndet werden und ziehen ggf. Prämienkürzung nach sich. Die Gewährung von Agrarzahlungen ist an die Einhaltung von EU-rechtlichen Standards geknüpft, die nach den sogenannten Cross-Compliance („Überkreuzehaltung von Verpflichtungen“) eingehalten werden müssen und durch Vor-Ort-Kontrollen überprüft werden. Die Anforderungen von Cross-Compliance (CC) enthalten Verpflichtungen zur Einhaltung von Vorschriften

und Richtlinien in den Bereichen Umweltschutz, Klimawandel, gutem landwirtschaftlichen Zustand der Flächen, Gesundheit von Mensch, Tier und Pflanze sowie Tierschutz. CC verknüpft kurz gefasst Prämienzahlungen für die Betriebe mit der Einhaltung der vorgenannten Umweltstandards.

Viele meteorologische Parameter sind in ihrer Kombination mitentscheidend, ob neben Düngung und Bodenbearbeitung auch anstehende Pflanzenschutzmaßnahmen optimal durchgeführt werden können.

Ob zu hohe Windgeschwindigkeiten in Kombination mit Blattnässe und Luftfeuchtigkeit beispielsweise zur Belastung von benachbarten Flächen, Biotopen oder Wohnbebauung führen können, sind Fragen, die sich mit Hilfe agrarmeteorologischer Modelle in großer Annäherung beantworten lassen. Pflanzenschutzmaßnahmen sind im Sinne der guten fachlichen Praxis standort-, kultur- und situationsbezogen durchzuführen und die Anwendung von Pflanzenschutzmitteln ist auf das notwendige Maß zu beschränken. Letztendlich liegt es in der Hand des Landwirtes, vor dem Hintergrund der vorgenannten umfassenden Beratungswerkzeuge und abgestimmt auf die besonderen Ausprägungen des Lokal- und Geländeklimas, eine möglichst schlagspezifische Entscheidung im Hinblick auf die erforderlichen Bewirtschaftungsmaßnahmen zu treffen.

- » Agrarmeteorologische Informationen, wie z.B. Bestandsklimadaten, fließen auch ein in Pflanzenschutz-Prognosemodelle für den zu erwartenden Befall mit Schädlingen im Obstbau oder für einen möglichen Befall mit verschiedenen Pflanzenkrankheiten in mittlerweile zahlreichen Kulturen des Ackerbaus. Sie sind besonders wichtig, um im Rahmen des integrierten Pflanzenbaus den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln zu optimieren und damit auch zu minimieren. Auch für die Präzisionslandwirtschaft (precision farming) sind agrarmeteorologische Prognosemodelle – neben dem Einsatz von geographischen Informationssystemen, teilflächenspezifischem Einsatz von Dünge- und Pflanzenschutzmaßnahmen, Bildanalysen, Sensoren und GPS-gesteuerter Bodenbewirtschaftung etc. – ein wesentliches Planungsinstrument.

Für die landwirtschaftlichen Betriebe ist neben einer ständigen Aktualisierung des speziellen agrarmeteorologischen Datenangebotes eine – in der Mehrzahl landwirtschaftlicher Betriebe bereits installierte – Zugänglichkeit zu internetbasierten Beratungs- und Anwendungsmodulen erforderlich.

Die Agrarmeteorologie liefert somit einen unmittelbaren Nutzen, der sowohl den landwirtschaftlichen Produzenten als auch der Umwelt zugutekommt.

Zunehmend bedeutend wird der Sachverhalt, dass bei größeren Einzelschlägen und umfangreicheren Produktionsabläufen die Wetterprognose einzelner Tage nicht mehr für die strategische Planung und Umsetzung von Bewirtschaftungsmaßnahmen ausreicht. Daher gilt es abzuschätzen, inwieweit das Wetter in den nächsten Tagen Beständigkeit hat – was mit dem physikalischen Zustand der Atmosphäre und dessen relativer Trägheit zusammenhängt. Landwirte benötigen eine Information darüber, wie genau die Prognose sein kann, um ihre Planung bzw. Bewirtschaftung zielgerichtet durchzuführen.

Die vorliegende Broschüre soll die Abhängigkeiten der landwirtschaftlichen Produktion von Klima und vom Wetter für ein breites Spektrum der in Deutschland angebauten Kulturpflanzen aufzeigen und darstellen, welche Leistungen des Deutschen Wetterdienstes zu anstehenden Entscheidungen in der landwirtschaftlichen Praxis benötigt werden. Dabei ist es Ziel, das vielfältige Angebot des Deutschen Wetterdienstes, insbesondere der Agrarmeteorologie, zur Weiterentwicklung der guten fachlichen Praxis in der Landwirtschaft noch besser zu nutzen.

### Inhalte der vorliegenden Broschüre

- » Agrarmeteorologische Grundlagen (Kapitel 4)
- » Auswirkungen von Boden- und Geländeklima auf die landwirtschaftliche Produktion (Kapitel 5.1)
- » Beschreibung agrarmeteorologischer Modelle (Kapitel 6)
- » Verfahren in der Anwendung für verschiedene ackerbauliche Kulturen (Kapitel 6)
- » Informationen zu Wetterbeobachtungen und Vorhersagemodellen (Kapitel 7)
- » Möglichkeiten der agrarmeteorologischen Beratung für die Politik (Kapitel 8)

Der Schwerpunkt der Broschüre liegt in der Dokumentation von agrarmeteorologischen Modellen und Verfahren und deren Anwendung für verschiedene ackerbauliche Kulturen sowie Grünland, Gemüse-, Obst- und Weinbau. Diese Broschüre richtet sich an Studierende sowie Berater im Agrarbereich und andere Interessierte, kann aber auch in der Ausbildung und in der landwirtschaftlichen Praxis genutzt werden. Mit ihr soll der Transfer des aktuellen Fachwissens in die landwirtschaftliche Praxis und in die Ausbildung junger Landwirte erhöht werden. Nicht zuletzt sollen Leserinnen und Leser eine Orientierung zum Leistungsangebot des Deutschen Wetterdienstes erhalten.



## 2 Klimatische Rahmenbedingungen und beobachtete Veränderungen

*Autoren: Wolfgang Janssen, Torben Meinert, Cathleen Frühauf*

Die Standorteigenschaften einer Fläche bestimmen die Anbaumöglichkeiten landwirtschaftlicher und gärtnerischer Kulturen sowie die Grünlandnutzung. Neben den Bodeneigenschaften sind die Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse während der Vegetationsperiode, aber auch in den Herbst- und Wintermonaten, von Bedeutung. Die Agrarklimatologie liefert Informationen vor allem für die langfristige Planung eines standortgerechten Kulturanbaus. Das Ertragspotential einer Kulturpflanze kann nur an den Standorten voll ausgeschöpft werden, deren Wärme- und Wasserangebot mindestens dem Bedarf der Pflanzen entspricht. Vielerorts nutzen Landwirte und Gärtner die technischen und wasserrechtlichen Möglichkeiten zum Einsatz der Feldberg-

nung in Entwicklungsphasen mit ausgeprägter Trockenheit. Hinweise für die Anbauwürdigkeit neuer Kulturen können Wärmesummen, der Bodenwasserhaushalt, die Dauer der frostfreien Periode sowie winterliche Temperaturen liefern.

Die klimatischen Rahmenbedingungen für die Landwirtschaft sollen zunächst anhand der wichtigen meteorologischen Bedingungen Niederschlag und Lufttemperatur aber auch der typischen agrarmeteorologischen Größen wie Verdunstung und Bodenfeuchte näher untersucht werden. Dabei wird auch auf die beobachteten Veränderungen aufgrund des Klimawandels eingegangen.

## 2.1 Niederschlag

Betrachtet man die durchschnittlichen Jahresniederschläge in Deutschland über die letzten 100 Jahre, so stellt man fest, dass diese zwischen 556 mm im Jahre 1911 bis 1018 mm im Jahre 2002 enorm schwanken können (Anmerkung: ein Millimeter Niederschlag entspricht einem Liter pro Quadratmeter bzw. 10 Kubikmetern pro Hektar).

Diese enorme Schwankungsbreite ist bei keinem anderen meteorologischen Element zu beobachten. Tendenziell hat der mittlere Jahresniederschlag in Deutschland von 758 mm (1901-1930) auf 819 mm (1981-2010) zugenommen.

Die Verteilung dieser 819 mm Niederschlag über Deutschland ist jedoch nicht gleichmäßig, sondern reicht von 500 mm in Teilen Brandenburgs und Sachsen-Anhalts bis über 1500 mm in den Mittelgebirgen und den Alpen (Abb. 2.1.1). Wieviel dieser Niederschläge während der Vegetationszeit fallen, ist ebenfalls in Abbildung 2.1.1 angege-

ben. In den eher kontinental geprägten Regionen im Osten dominiert der sommerliche Niederschlag im Gegensatz zu den vorwiegend im Westen liegenden Regionen. Letztere bekommen im Winterhalbjahr, durch häufig aus Nordwesten kommende Tiefausläufer, mehr Niederschläge als im Sommerhalbjahr.

Insgesamt wird eine Zunahme bei den Jahresniederschlägen beobachtet. Diese Zunahme wird allerdings vorwiegend im Winterhalbjahr beobachtet und führt in der Regel zu einem Auffüllen der Boden- und vielerorts auch der Grundwasservorräte. In dem für das Pflanzenwachstum wichtigen Sommerhalbjahr fallen im Mittel 427 mm (1981-2010), also etwas mehr als die Hälfte des Jahresniederschlages. Dieser Wert hat sich gegenüber dem Zeitraum 1961-1990 mit 425 mm kaum verändert. Die regionalen Schwankungen zwischen den beiden Perioden sind in Abbildung 2.1.2 dargestellt. Sie dürfen in Anbetracht der großen Schwankungsbreite beim Niederschlag nicht überinterpretiert werden, deuten allerdings eine Verknappung im Südwesten an.

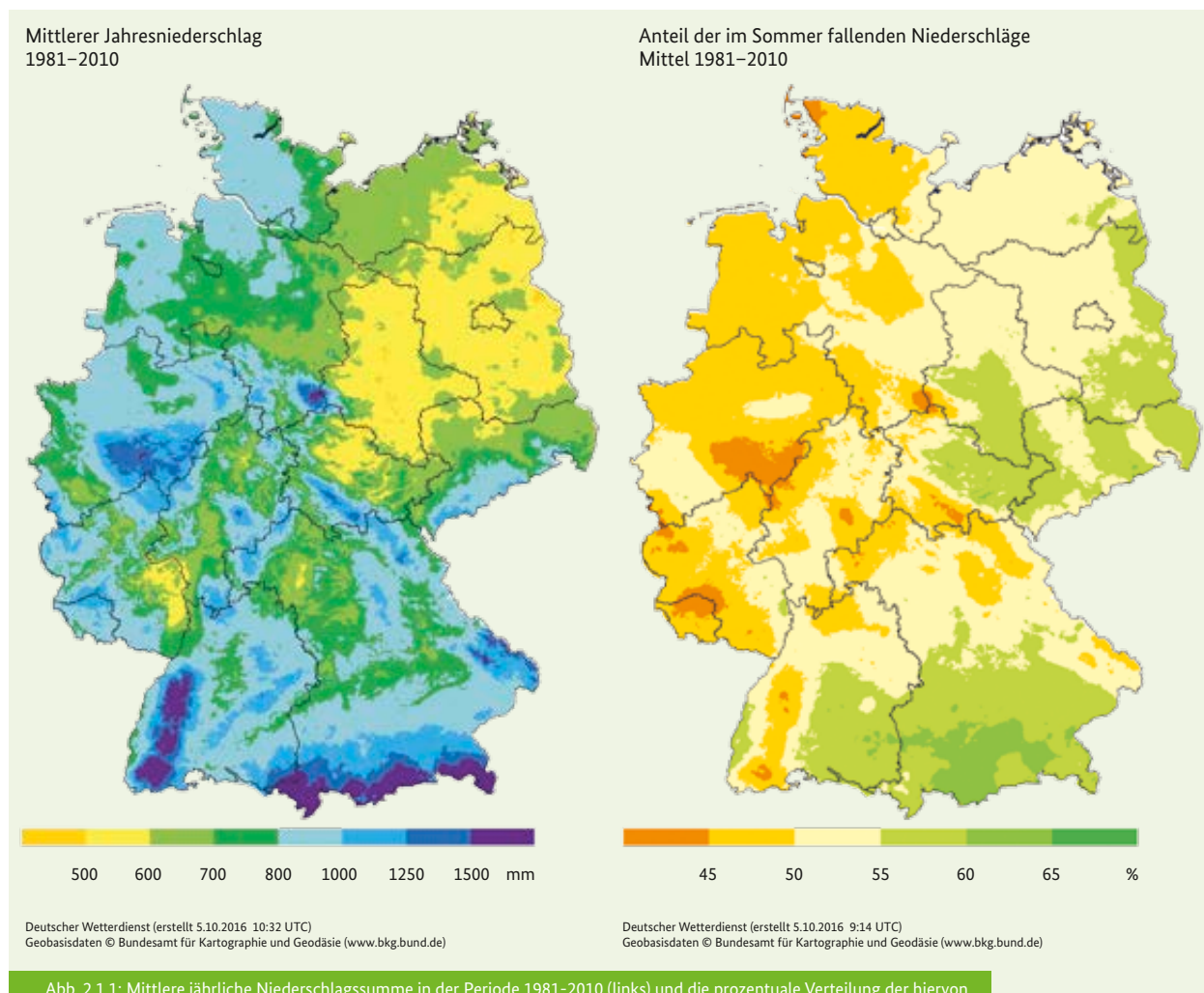


Abb. 2.1.1: Mittlere jährliche Niederschlagssumme in der Periode 1981–2010 (links) und die prozentuale Verteilung der hiervon in der Hauptwachstumszeit (1.3.–31.8.) fallenden Niederschläge (rechts) von ca. 650 Stationen mit vollständigen Monatswerten.



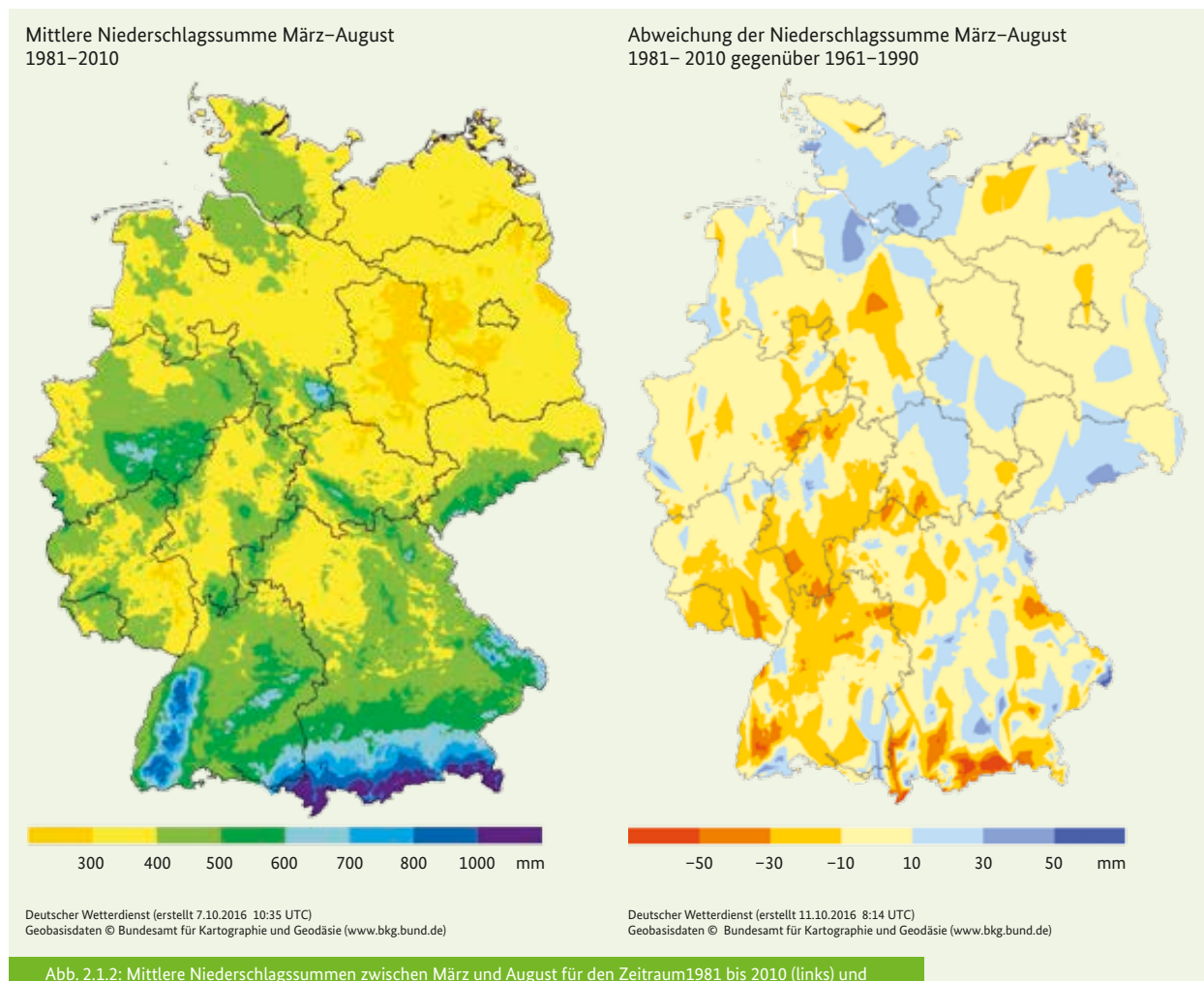


Abb. 2.1.2: Mittlere Niederschlagssummen zwischen März und August für den Zeitraum 1981 bis 2010 (links) und die mittlere Abweichung zur der Periode 1961 bis 1990 (rechts) von ca. 650 Stationen mit vollständigen Monatswerten.

Im Gegensatz zur mittleren Jahresniederschlagssumme sind bei der mittleren sommerlichen Verteilung die regionalen Unterschiede nicht mehr ganz so groß, jedoch bleiben auch hier die Minima in einem von den Mittelgebirgen unterbrochenen Streifen vom südlichen Rheinland-Pfalz bis zum südöstlichen Mecklenburg-Vorpommern erhalten.

Ein weiterer interessanter Aspekt ist die zeitliche Verteilung der Niederschläge. Für die Landwirtschaft ist es von Vorteil, wenn Niederschläge regelmäßig als Landregen und nicht in Form von wenigen Starkregenereignissen fallen. Bei sehr hohen Niederschlagsintensitäten kann das Wasser nicht in vollem Umfang genutzt werden, insbesondere bei nicht ausreichender Aufnahmefähigkeit des Bodens und vorhandenen Schadverdichtungen innerhalb des Wurzelhorizontes. Durch die geringere Versickerungsgeschwindigkeit bleibt dann ein Teil des Wassers auf der Oberfläche stehen. Ist die Fläche geneigt, fließt das Wasser oberirdisch ab und kann so zu Bodenerosion führen.

Um zu überprüfen, ob sich während der Vegetationsperiode zwischen März und August das Niederschlagsverhalten verändert hat, wurde von allen seit 1961 vollständigen vor-

liegenden Zeitreihen eine Niederschlagsklassenanalyse aller Tagesniederschläge durchgeführt (Abb. 2.1.3). Jährlich wurde die Anzahl der Fälle innerhalb einer Klasse für alle Stationen in Schritten von 10 mm ausgezählt. Über die Jahre sind keine signifikanten Veränderungen für ganz Deutschland festzustellen, wobei die jährlichen Schwankungen beträchtlich sein können.

Dieser Sachverhalt würde auf den ersten Blick den Schluss nahelegen, dass sich für die Pflanzen nicht viel verändert hat. Doch innerhalb des betrachteten, recht langen Zeitraumes ist es zu Verschiebungen gekommen, wie Abbildung 2.1.4 verdeutlicht.

Gerade im Frühjahr ist festzustellen, dass die Anzahl der Tage ohne Niederschlag in den letzten Jahrzehnten in ganz Deutschland zugenommen hat und besonders im Osten mit über 35 Tagen stark ausgeprägt ist. Dieses bedeutet auf der anderen Seite, dass die Regenmengen an den verbleibenden Niederschlagstagen höher sind oder dass die Niederschläge im Herbst zugenommen haben müssen, damit die gleichbleibende Niederschlagssumme des Sommerhalbjahrs erklärt werden kann. Die Abbildung 2.1.5 zeigt die mittleren

Abb. 2.1.3: Niederschlagsklassenanalyse von 198 Stationen mit vollständigen Tageswerten zwischen 1961 bis 2015 während der Vegetationsperiode zwischen März und August.

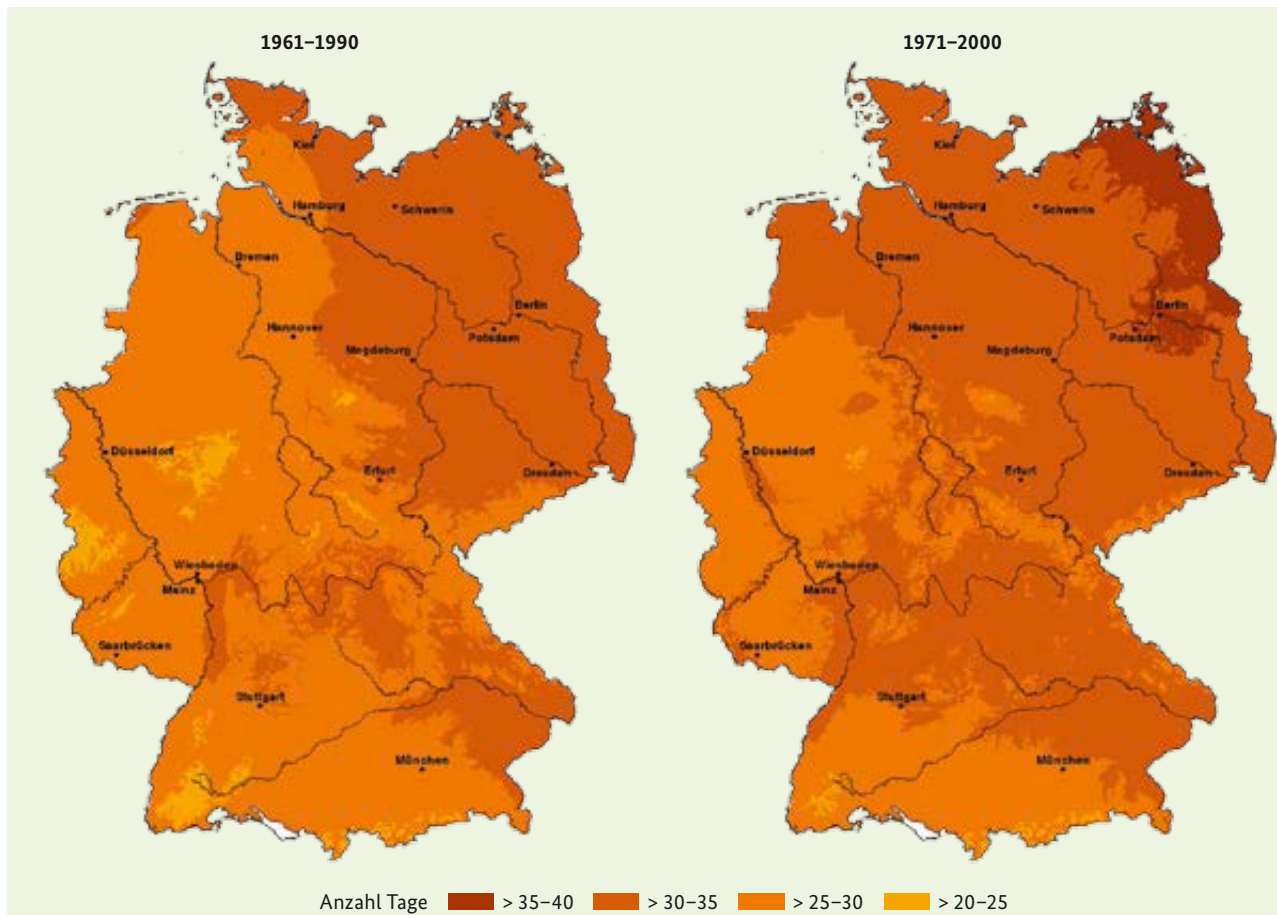
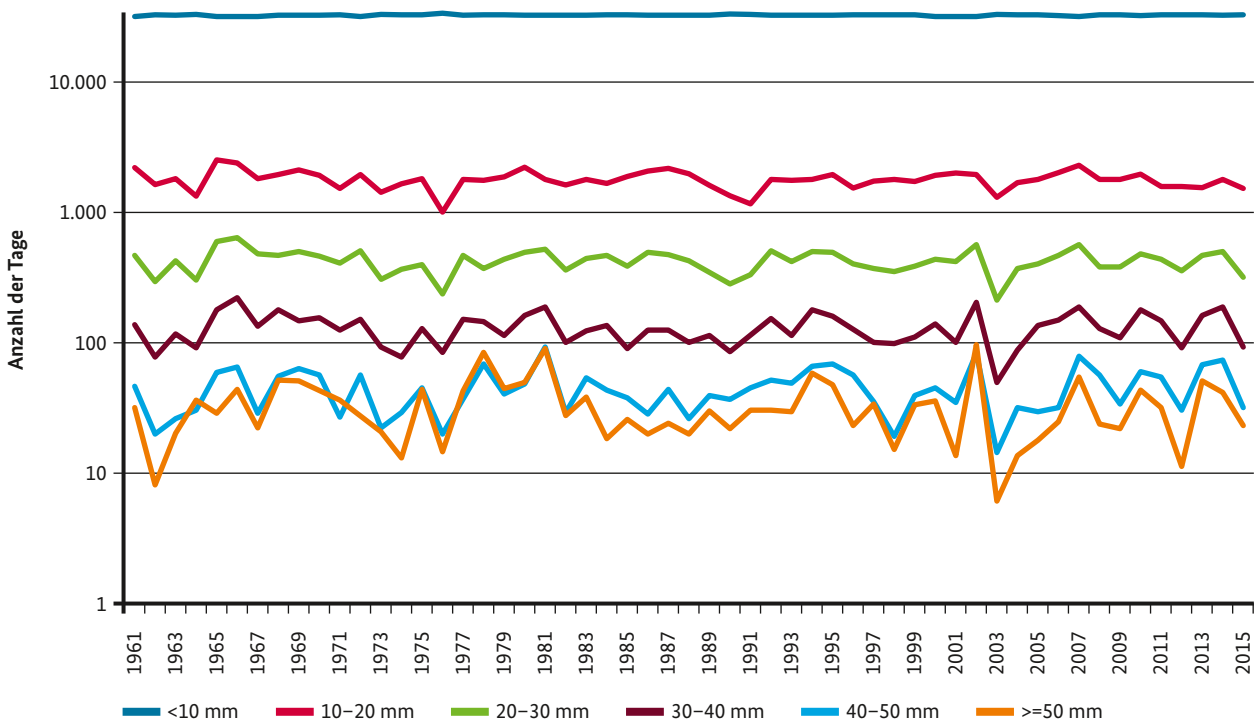
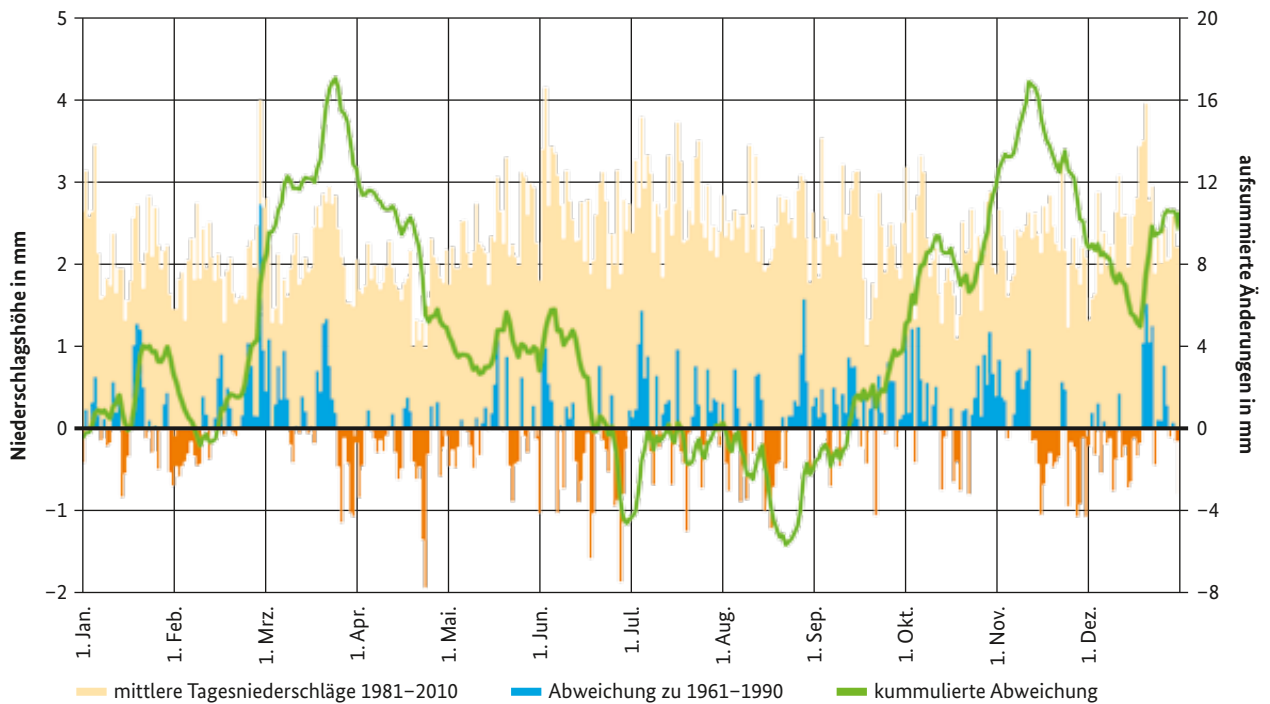


Abb.2.1.4: Mittlere Anzahl der niederschlagsfreien Tage in der Zeit vom 15.3. bis 15.5. für verschiedene Zeiträume (Gömann et al., 2015).

Abb. 2.1.5 Mittlere Tagesniederschläge in Deutschland in der Periode 1981-2010 (graue Säulen) und die Änderung dieser Verteilung zu der Periode 1961-1990 (blaue und orange Säulen) sowie die über das Jahr aufsummierten Änderungen (grüne Linie) von 198 Stationen mit vollständigen täglichen Niederschlagssummen



Tagesniederschläge über das Jahr für die Periode 1981-2010 in Deutschland, die Abweichung zu den mittleren Tagesniederschlägen der Periode 1961-1990 sowie die über das Jahr aufsummierten Änderungen.

Die täglichen Änderungen zu der älteren Periode können von Tag zu Tag schwanken, daher ist die Kurve der aufsummierten Werte der Änderungen leichter zu interpretieren. Steigt die Kurve an, so fällt vergleichsweise mehr Niederschlag in der Periode, fällt die Kurve, so werden weniger Niederschläge beobachtet. In den Zeiträumen Mitte Februar bis Ende März und Ende August bis Mitte November fallen etwa 15 bis 20 mm mehr Niederschlag als in der Periode 1961-1990. Von Ende März bis Ende August, der Hauptwachstumszeit, hat sich die Niederschlagsmenge jedoch um 20 mm reduziert.

Tendenziell nehmen Niederschläge Im Winterhalbjahr zu und bleiben im Sommerhalbjahr gleich, wobei im Frühjahr weniger und im Herbst mehr Niederschlag fällt.

## 2.2 Temperatur

Im Gegensatz zu den Niederschlägen sind Temperaturen vergleichsweise einfach zu messen und eher im Fokus der Öffentlichkeit, wenn z. B. über den Klimawandel gesprochen wird.

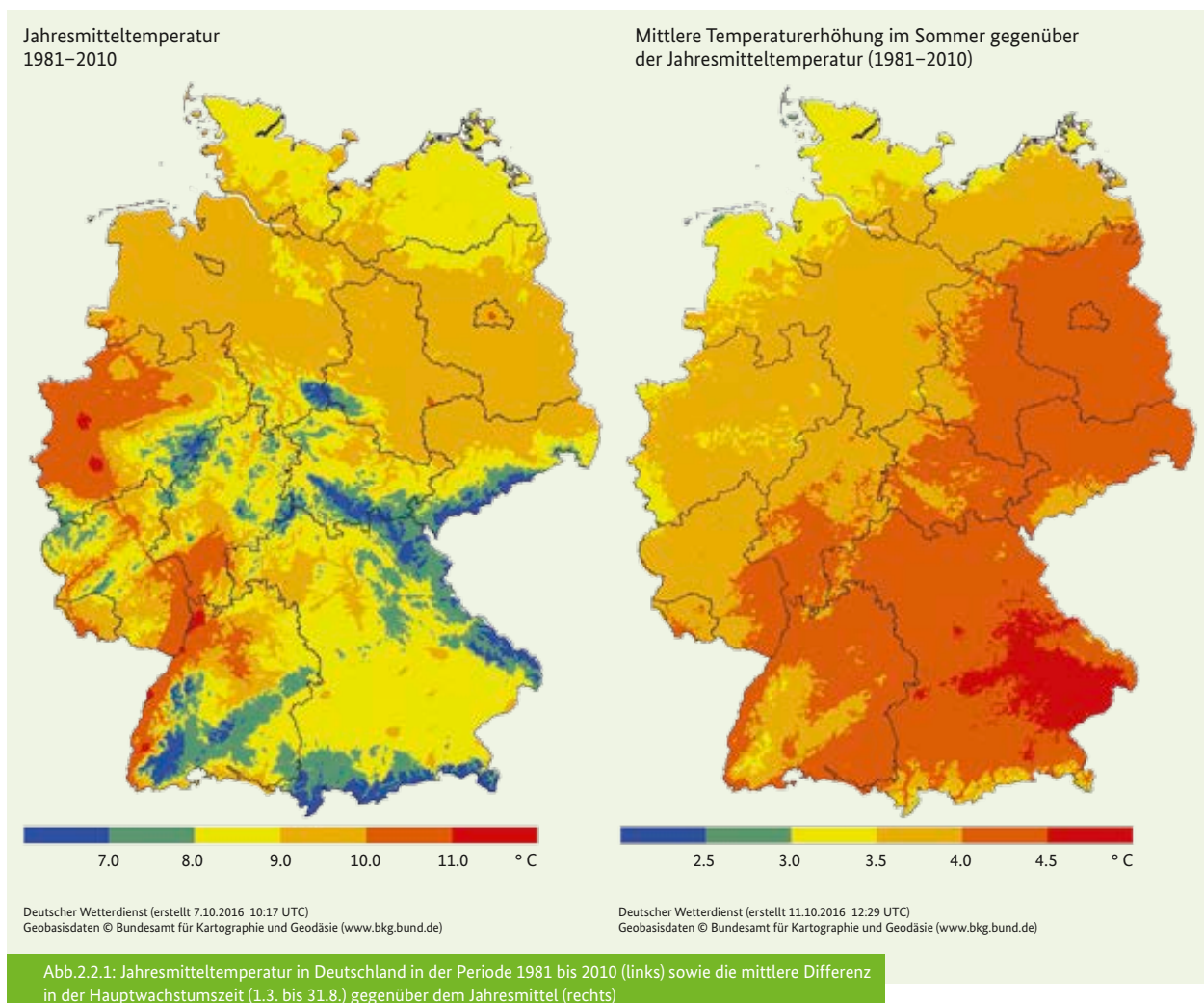
Aufgrund des wechselnden Sonnenstandes ist ein ausgeprägter Jahresgang bei den Temperaturen festzustellen. Im Mittel über das Jahr sind 8,8 °C in der Periode 1981-2010 in Deutschland gemessen worden (Abb. 2.2.1), wobei die wärmsten Regionen im Rheintal anzutreffen sind. In den letzten 100 Jahren war das Jahr 1940 mit 6,6 °C am kältesten und das Jahr 2014 mit 10,3 °C im Jahresmittel am wärmsten.

Während des Sommerhalbjahres (März – August) steigt die Temperatur gegenüber dem Jahresmittel in Deutschland um 4 °C auf 12,8 °C an, wobei der Anstieg bei den mehr maritim geprägten Regionen geringer ist als bei den mehr kontinental geprägten Regionen. Entsprechend dieser Verteilung (Abb. 2.2.1 rechts) gehen die Temperaturen im Winterhalbjahr um

den gleichen Betrag nach unten, so dass die Jahresamplitude in den mehr kontinental geprägten Regionen größer als in den maritim geprägten Regionen ist.

Vergleicht man die Periode 1981 bis 2010 mit der von 1961 bis 1990, so stellt man fest, dass die mittlere Jahrestemperatur in Deutschland um 0,8 °C angestiegen ist (seit 1881: 1,4 °C). Die genaue räumliche Verteilung der Erhöhung der Lufttemperaturen im Sommerhalbjahr ist ebenfalls interessant (Abb. 2.2.2 links). Wie bei der Jahresmitteltemperatur liegt die Erhöhung im Mittel bei 0,8 °C. Regionale Unterschiede sind nur schwer auszumachen, da kleinräumige Besonderheiten das Bild stören. Wie beim Niederschlag deuten sich die stärksten Veränderungen mit einem Temperaturanstieg von über 1 °C im Südwesten und Süden an.

Interessant ist weiterhin, ob sich die in Abbildung 2.2.1 (rechts) dargestellte Temperaturerhöhung im Sommer gegenüber der Jahresmitteltemperatur verändert hat. Das Ergebnis ist in Abbildung 2.2.2 rechts zu sehen und zeigt eine Verstärkung der Erwärmung im Sommer um durchschnittlich 0,2 °C zur Periode 1961-1990.



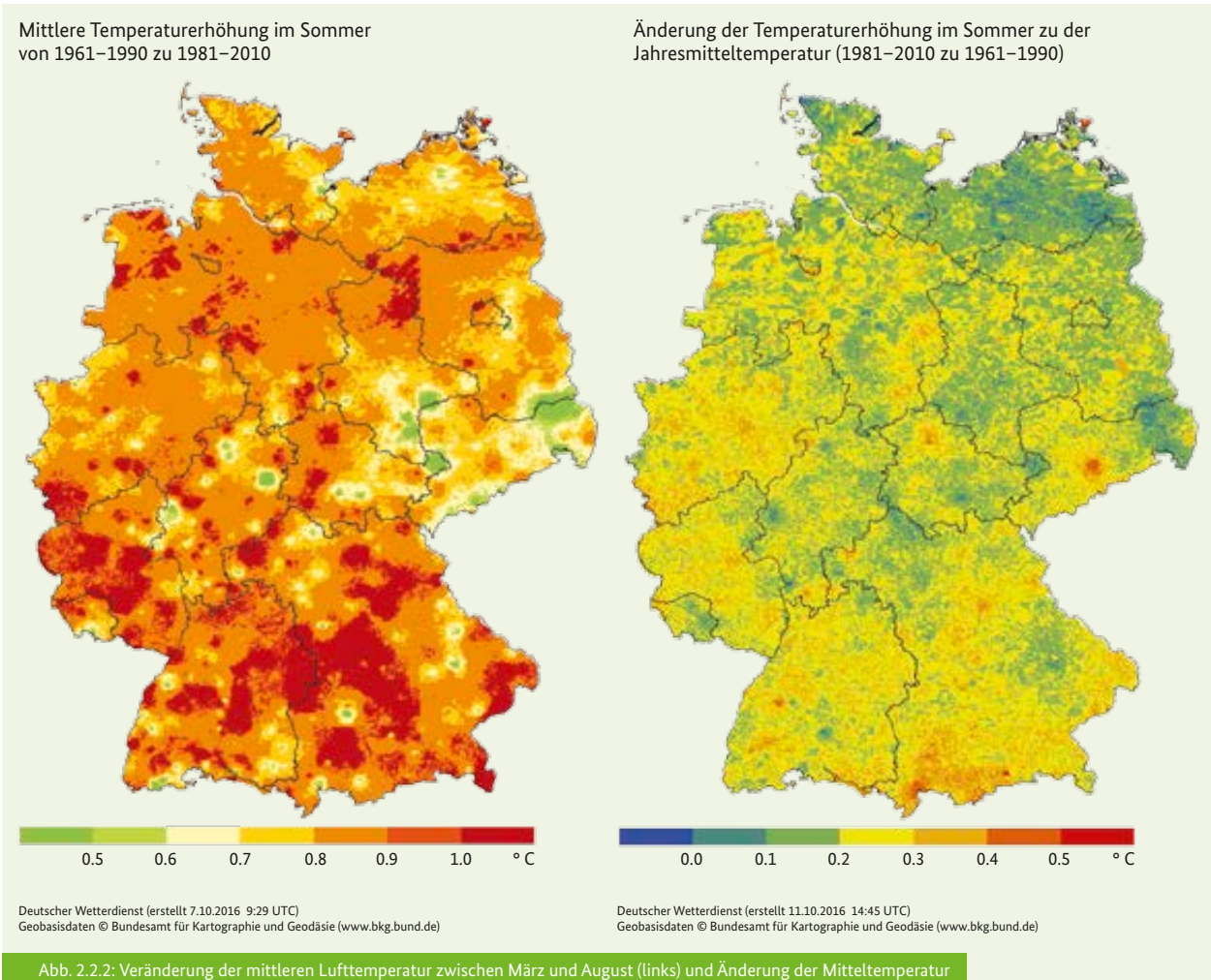
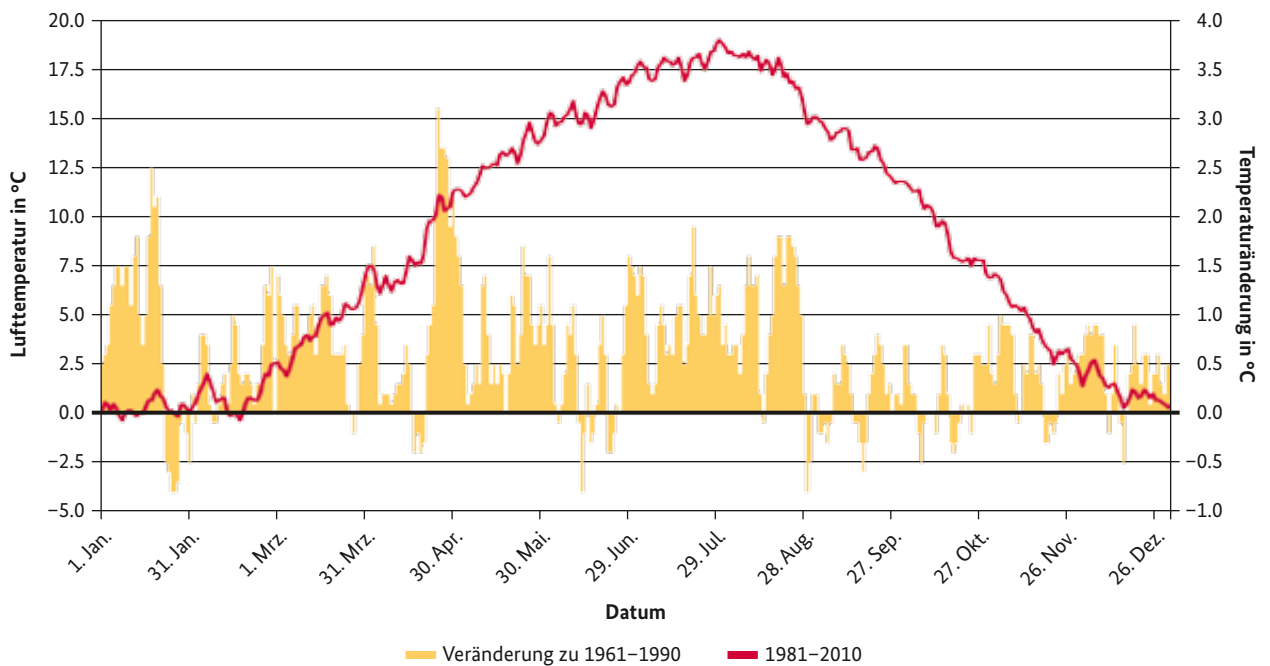


Abb. 2.2.2: Veränderung der mittleren Lufttemperatur zwischen März und August (links) und Änderung der Mitteltemperatur im Sommerhalbjahr gegenüber der Jahresmitteltemperatur (rechts) im Vergleich von Zeitraum 1961–1990 zu 1981–2010

Abb. 2.2.3: Mittlerer Verlauf der Tagesmitteltemperaturen in Deutschland für den Zeitraum 1981–2010 (rote Kurve) und die Veränderung gegenüber der Periode 1961–1990 (orange Säulen)



Dies bedeutet, dass im Sommerhalbjahr eine stärkere Erwärmung gegenüber der Jahresmitteltemperatur stattgefunden hat und somit gleichzeitig die Jahresamplitude zugenommen hat, trotz wärmerer Temperaturen im Winter. Außerdem ist in der räumlichen Änderung ein Gefälle von Südwest nach Nordost zu erkennen.

Die Unterschiede zwischen Sommer- und Winterhalbjahr haben somit im Süden von Deutschland tendenziell stärker zugenommen als im Norden. Natürlich werden Leugner behaupten, dass sich bei einigen Wetterstationen das Umfeld über die Jahrzehnte stark verändert hat und für diesen Anstieg verantwortlich ist. Solche Effekte mögen lokal eine noch stärkere Erwärmung von über 1 °C erklären, doch dass an allen Stationen ein Temperaturanstieg zu beobachten ist, ist ein Signal für allseits steigende Temperaturen.

Des Weiteren sollen die Veränderungen der Tagesmitteltemperaturen im Jahresgang gezeigt werden. Hierzu wurden von allen Stationen mit vollständigen Temperaturwerten die mittlere Tagestemperatur für die Periode 1981-2010 sowie die Veränderung zu der Periode 1961-1990 in Abbildung 2.2.3 dargestellt. Die stärksten Temperaturerhöhungen treten in

den ersten 8 Monaten auf und erreichen Ende April sogar Werte um 3 °C. Die geringsten Veränderungen sind im September und Oktober zu beobachten.

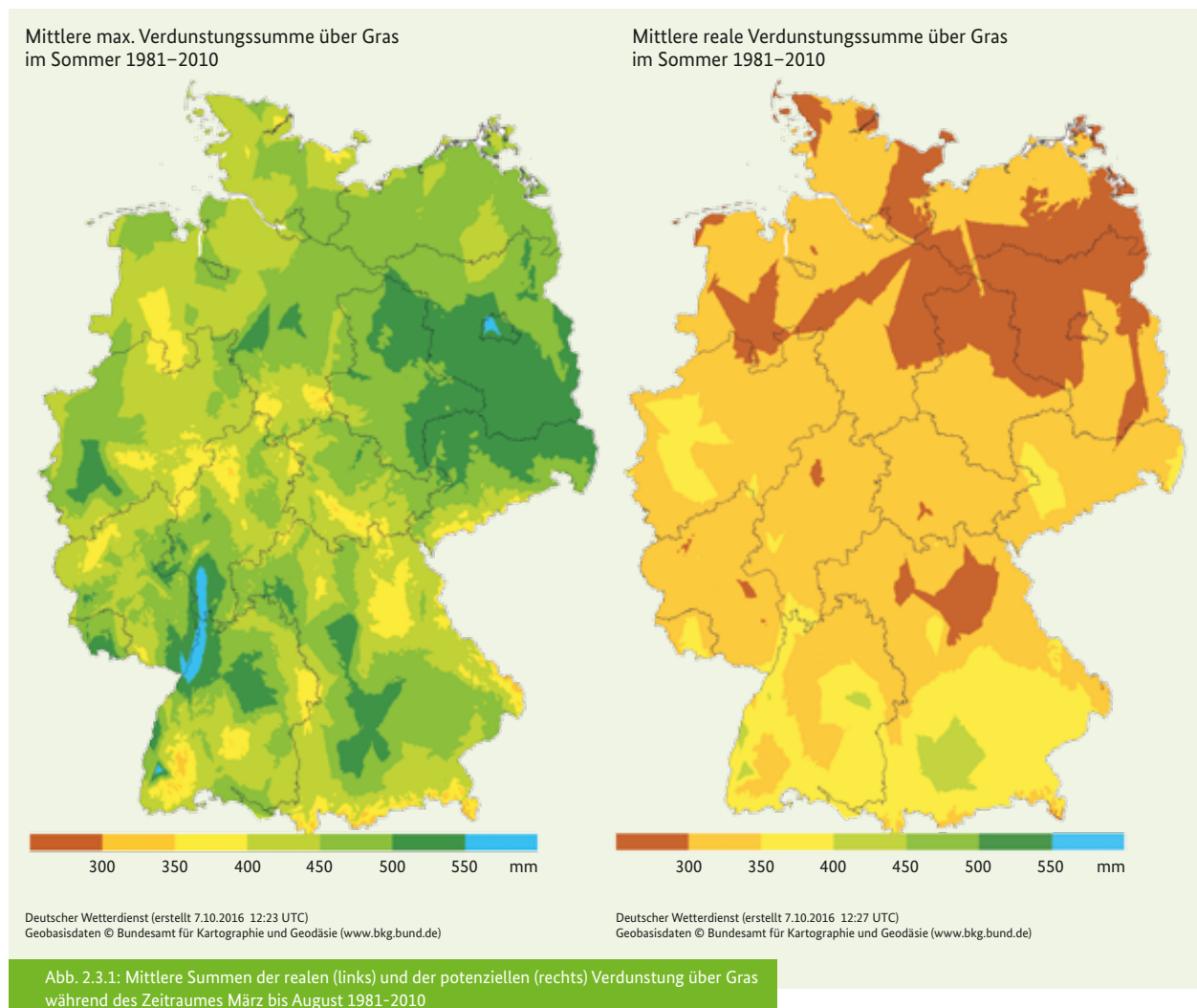
Mittlere Jahresmitteltemperatur in Deutschland:

- Zunahme seit 1961 um 0,8 °C auf 8,8 °C.
- bis auf den Herbst deutliche Zunahme in allen Jahreszeiten

## 2.3 Verdunstung und Bodenfeuchte

Die Verdunstung und die Bodenfeuchte werden im Kapitel 3 genau beschrieben. Hier werden vorab die wichtigsten Fakten zusammengestellt.

Ähnlich der Temperatur hat die Verdunstung einen starken Jahresgang und ist im Sommer sehr viel höher als im Winter, da die agrarmeteorologische Verdunstung eng mit dem Pflanzenwachstum und der Temperatur gekoppelt ist. Im



Gegensatz zu den bisher beschriebenen Größen wird die Verdunstung in der Regel berechnet, da die Messmethode sehr aufwendig und die Verdunstung für jede Kultur unterschiedlich ist. Da Grünland während der gesamten Vegetationsperiode wächst, wird hier die agrarmeteorologische Verdunstung über Gras betrachtet. Die mittleren Verdunstungswerte werden in Abbildung 2.3.1 aufgezeigt.

Im Mittel konnte in Deutschland in den Sommerhalbjahren 1981 bis 2010 maximal 457 mm Wasser über Grünland verdunsten, real lag der Wert allerdings bei nur 325 mm, da aufgrund zu geringer Bodenfeuchte die Verdunstung der Pflanzen (Transpiration) sowie der Bodenfläche (Evaporation) reduziert wurde.

In der regionalen Verteilung ist deutlich der trockenere Nordosten mit realen Verdunstungssummen unter 300 mm und der feuchtere Süden mit Werten über 400 mm zu erkennen. Wenn im Sommer in allen Gebieten genügend Regen fallen würde, dann würde die reale Verdunstung der maximal möglichen entsprechen. Dies lässt den Rückschluss zu, dass in den Regionen mit den größten Unterschieden zwischen realer und potentieller Verdunstung aus Abbildung

2.3.1 der Wassermangel am größten ist. Die Differenz ist in Abbildung 2.3.2 dargestellt und zeigt sehr eindrucksvoll die trockeneren Gebiete in Deutschland. Dies wirkt sich ebenfalls deutlich auf die Bodenfeuchte aus. Abbildung 2.3.2 (rechte Grafik) zeigt die mittlere Bodenfeuchte unter Gras für den Monat August, der in der Regel über das Jahr gesehen die niedrigsten Werte aufweist. Die beiden Grafiken ähneln sich stark und zeigen, dass Verdunstung und Bodenfeuchte eng miteinander zusammenhängen.

In den rot gekennzeichneten Gebieten von Abbildung 2.3.2, vornehmlich also die nordostdeutsche Tiefebene und der süddeutsche Raum mit den Schwerpunkten Hessisches Ried und Vorderpfalz können über die technischen Verfahren der Feldberegnung Erträge gesichert bzw. gesteigert und die Qualität der Ernteprodukte erhalten und verbessert werden.

Mit jeder Erhöhung der Lufttemperatur um 10 °C kann die Luft doppelt so viel Wasser aufnehmen, weshalb bei höheren Temperaturen auch mehr Wasser verdunsten kann.

Berechnungen für die Hauptwachstumszeit März bis August zeigen, dass bei einem Grasbestand im Mittel über Deutsch-

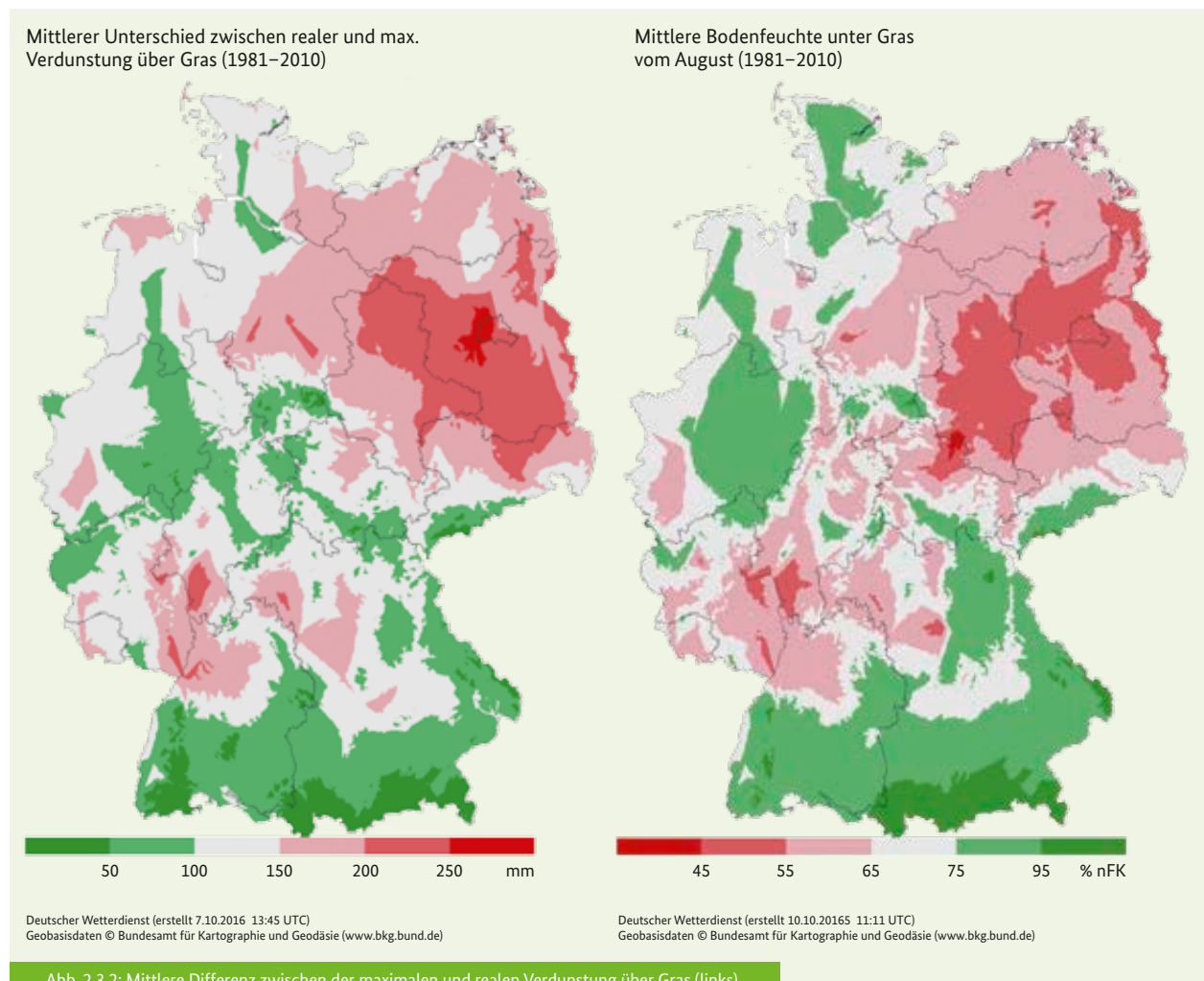


Abb. 2.3.2: Mittlere Differenz zwischen der maximalen und realen Verdunstung über Gras (links) sowie mittlere Bodenfeuchte unter Gras im August (rechts) während der Periode 1981-2010

land die maximal mögliche Verdunstung im Vergleich der Zeiträume 1961-1990 und 1981-2010 bereits um ca. 30 mm und die reale Verdunstung im Mittel um 10 mm zugenommen hat. Das entspricht in etwa der verdunsteten Wassermenge von 4 Tagen. Selbst bei gleichbleibender Niederschlagshöhe und -verteilung führt dies zu einer geringeren Bodenfeuchte.

In welchem Bereich sich die Bodenfeuchte über das Jahr bewegt und wie sie sich im Vergleich zu der Periode 1961-1990 verändert hat, zeigt Abbildung 2.3.3 für eine 60 cm Bodenschicht aus sandigem Lehm, auf der Gras wächst. Die dargestellten Werte sind Mittelwerte für Deutschland und schwanken regional stark, wie bereits in Abbildung 2.3.2 (rechts) verdeutlicht wurde.

In den Wintermonaten liegt die Bodenfeuchte der Böden meist bei 100 %nFK. Bei unzureichender Versickerungsleistung oder hoch anstehendem Grundwasser können auch höhere Werte erreicht werden (siehe Kap. 3). Die Wasservorräte der Böden sind dann meist aufgefüllt und die Niederschläge höher als die Verdunstung. Sinkt die Bodenfeuchte, dominiert die Verdunstung, steigt sie an, überwiegt der Niederschlag. Die geringsten Bodenfeuchtwerte werden im Juli und August erreicht.

Aus den dargestellten Veränderungen zu der Periode 1961-90 wird deutlich, dass ab Anfang April bis Ende August die Bodenfeuchte in jüngster Zeit im Mittel durchgängig geringer (orange Säulen) und in den Monaten Oktober und November (grüne Säulen) angestiegen ist.

Die Verringerung der Bodenfeuchte im Frühjahr (Frühjahrsstrockenheit) wird zum einen durch einen leichten Rückgang der Niederschläge, zum anderen durch das mit den höheren

Temperaturen verbundene frühere Einsetzen der Vegetation und den höheren Verdunstungsraten verursacht.

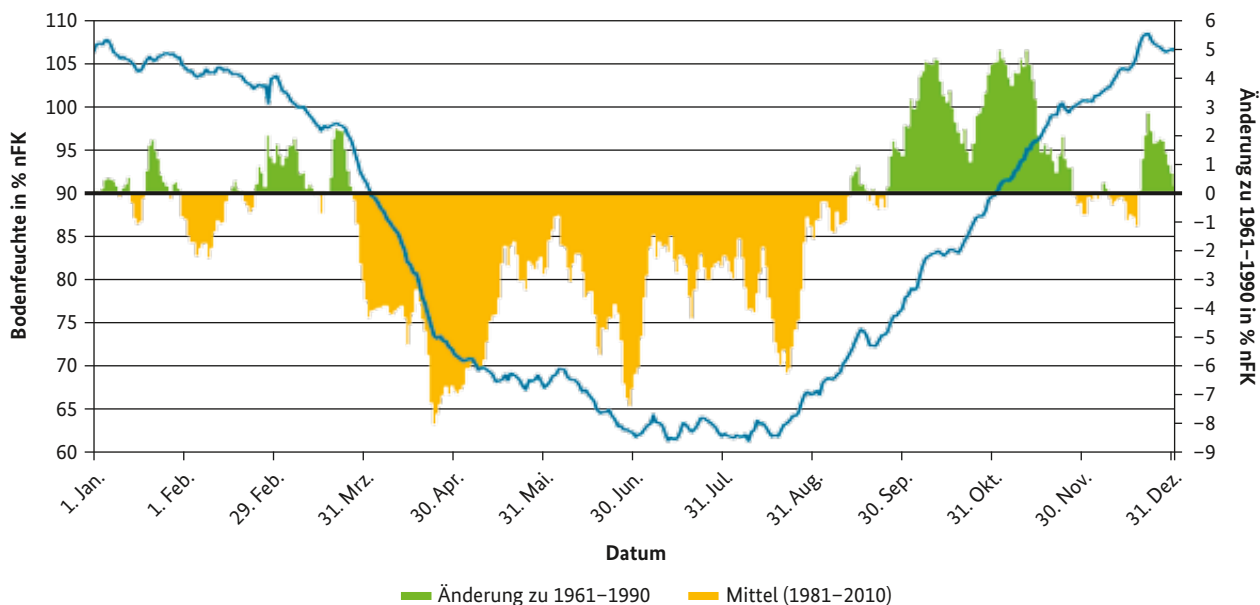
Einmal auf einem niedrigeren Bodenfeuchte-Niveau angelangt, bedarf es in der Vegetationszeit größerer Regenmengen, um den Boden wieder aufzufüllen.

Der Vergleich der Zeiträume 1981-2010 zu 1961-1990 zeigt: Die höheren Bodenfeuchten im Oktober und November (Abb. 2.3.3) sind mit vergleichsweise deutlich höheren Niederschlagsmengen im Spätsommer und Frühherbst zu erklären.

Diese Betrachtung gilt für Gras; bei anderen Feldfrüchten, insbesondere Getreide und Raps, nimmt die Verdunstung bis zum Erntetermin kontinuierlich ab, so dass hier gesonderte Analysen durchgeführt werden müssen. Tendenziell kann man sagen, dass in der Hauptwachstumsphase im Frühjahr durchschnittlich weniger Wasser und in der Aussaatzeit für Wintersaaten mehr Wasser im Boden zur Verfügung steht. Nach der Ernte von z.B. Getreide, Raps und Körnerleguminosen (Ackerbohnen, Futtererbsen, Sojabohnen) und Silo- und Körnermais beschränkt sich der Wasserverbrauch auf die Verdunstung aus dem Boden. Niederschläge führen dann zum Auffüllen der Böden. Je früher die Ernte erfolgt, desto höhere Bodenfeuchteunterschiede können im Herbst beobachtet werden.

- Umso größer die Differenz zwischen der realer und potenzieller Verdunstung ist, umso geringer sind die Wasservorräte im Boden.
- Geringere Niederschläge und höhere Temperaturen im Frühjahr führen zu geringerer Bodenfeuchte

**Abb.2.3.3: Durchschnittlicher Jahresverlauf der Bodenfeuchte unter Gras und sandigem Lehm für die Zeiträume 1981-2010 (blaue Kurve) und die Veränderungen zum Zeitraum 1961-1990 (orange und grüne Säulen). Die Bodenfeuchte wird in % nutzbarer Feldkapazität (nFK) angegeben.**





## 2.4 Boden

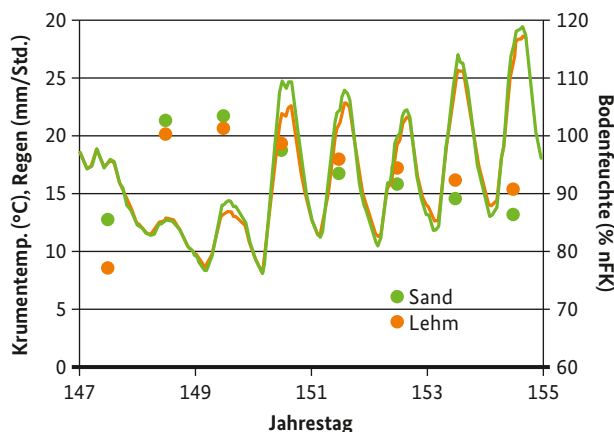
Wie eingangs schon erwähnt, werden die Anbaumöglichkeiten der Kulturen auch durch die Böden bestimmt, die sich über lange Zeiträume unter dem Einfluss des Klimas gebildet haben und deren wesentliche physikalische Eigenschaften durch die Zusammensetzung der Kornfraktionen bestimmt werden. Bei diesen physikalischen Eigenschaften ist besonders das unterschiedliche Wärme- und Wasserspeichervermögen von Interesse, welches durch bodenartabhängige Kennwerte charakterisiert wird (Tab. 2.4.1).

Obwohl die in Tabelle 2.4.1 aufgeführten Böden nahezu gleich viel Wasser speichern können, unterscheiden sie sich doch merklich voneinander und zeigen besonders im trockenen Zustand große Unterschiede. Gemäß Tabelle 3.1 (in Kapitel 3.1) ist Luft ein schlechter Wärmeleiter und gilt daher als Isolator. Trockene und jüngst bearbeitete, lockere Böden heizen sich unter hoher Einstrahlung sehr rasch an der Oberfläche auf, da die Wärme aufgrund der Lufteinschlüsse und des geringeren Wassergehaltes weniger stark in die Tiefe geleitet wird als bei feuchten und kompakten Böden. Aus gleichem Grund zeigen trockene, poröse Oberböden nachts eine deutlichere Abkühlung als feuchte und dicht gelagerte Böden, da Wasser die Wärme gut speichert und leitet. Nicht selten kann die Frostgefährdung auf dränierten Acker- oder Grünlandflächen wegen des vorgenannten geringeren Wärmetransportvermögens ansteigen.

Welchen Einfluss diese unterschiedlichen Bodeneigenschaften auf die Bodentemperaturen und -feuchten hat, soll anhand einer Simulation mit dem Bestandsklimamodell BEKLIMA (siehe Kapitel 4.3) verdeutlicht werden. In der Simulation mit den Böden aus Tab. 2.4.1 wird als Antrieb das gleiche Wettergeschehen angenommen, d.h. identische Niederschlags- und Einstrahlungsbedingungen sowie identische Lufttemperatur- und -feuchteverläufe. Abbildung 2.4.1 zeigt die simulierten Unterschiede im Verlauf einer Niederschlags- und einer folgenden Schönwetterperiode.

Das Beispiel zeigt, dass in der abtrocknenden Krume des Sandbodens sich höhere Temperaturamplituden entwickeln können als in der Krume des Lehmbodens. Darüber hinaus trocknet der Sandboden schneller als der Lehm ab und ist deshalb nur für jene Kulturen als Standort geeignet, die entweder trocken tolerant sind oder aber beregnet werden können.

Abb. 2.4.1: Vergleich der Krumentemperatur in 5 cm Tiefe (durchgezogene Kurve) und der Bodenfeuchte (Punkte als Mittel über die Tiefe 0 – 60 cm) eines Sand- und Lehmbodens (Modellsimulation mit meteorologischen Daten der DWD-Station Braunschweig, 2014). Die Bodenfeuchten repräsentieren die Bedingungen des ganzen Tages.



Namentlich die sogenannten C4-Pflanzen (Mais, Amarant, Hirse, Zuckerrohr) zeichnen sich im Gegensatz zu den meisten, in gemäßigten Regionen angebauten Kulturpflanzen (C3-Pflanzen) durch höhere Trockenresistenz beziehungsweise geringere Transpirationsverluste, bessere CO<sub>2</sub>-Verwertung und Toleranz gegenüber höheren Temperaturen aus. Ein Substanzgewinn tritt allerdings erst bei Tagesdurchschnittstemperaturen über 15 °C ein.

In feuchten Böden ist durch Einstrahlung nur ein langsamer Wärmegewinn zu erzielen, da die Energie teilweise in Verdunstungsenergie umgewandelt und durch den Wasserdampftransport an die Atmosphäre abgegeben wird. Andererseits kühlen sich feuchte Böden nur moderat ab, da Wasser als Wärmespeicher wirkt. Trockene Böden zeigen dagegen im Tages- oder Jahresverlauf größere Temperaturamplituden mit höheren Maxima nach Sonnenhöchststand (Mittag, Sommer) sowie tieferen Minima während der Dunkelphasen (Nacht, Winter).

Insofern wird der deutschlandweite Bodenzustand über räumliche Verteilungen des Niederschlags, der Temperatur und Strahlung mit entsprechenden Tages- und Jahresamplituden bestimmt. Die statistische Variabilität der atmosphärischen Bedingungen entscheidet über die Spannweite und Häufigkeit möglicher Bodenzustände.

Tabelle 2.4.1: Bodenhydraulische und thermodynamische Parameter für reinen Sand und sandigem Lehm (siehe auch Tab. 3.1 mit thermodynamischen Angaben für Wasser und Luft)

Bodenart	Welkepunkt in m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	Feldkapazität in m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	Wärmeleitfähigkeit in W/(m K) bei		Wärmekapazität in MJ/(m <sup>3</sup> K) bei	
			Welkepunkt	Feldkapazität	Welkepunkt	Feldkapazität
Sand	0.03	0.20	0.41	2.00	1.37	2.08
s. Lehm	0.17	0.35	1.44	1.94	2.0	2.75

Abb. 2.4.2: Boden-Klima-Räume in Deutschland  
(Roßberg et al. 2007, Graf et al. 2009)



BKR-Nummer	BKR-Bezeichnung
101	mittlere diluviale Böden MV und Uckermark
102	sandige diluviale Böden des nordostdeutschen Binnentieflandes
104	trockene-warme diluviale Böden des ostdeutschen Tieflandes
105	vorpommersche Sandböden im Uecker-Randow-Gebiets
106	Oderbruch
107	Lößböden in der Ackerebene (Ost)
108	Lößböden in den Übergangslagen (Ost)
109	diluviale Böden der Altmark und Überlappung nördliches Niedersachsen
111	Verwitterungsböden in den Übergangslagen (Ost)
112	Verwitterungsböden in den Höhenlagen (östliches Bayern)
113	Nordwestbayern-Franken
114	Albflächen und Ostbayerisches Hügelland
115	Tertiär-Hügelland Donau-Süd
116	Gäu, Donau- und Inntal
117	Moränen-Hügelland und Voralpenland
120	Hochrhein-Bodensee
121	Rheinebene und Nebentäler
122	Schwäbische Alb, Baar
123	Oberes Gäu und körnermaisfähige Übergangslagen

Die anfangs beschriebenen klimatischen Rahmenbedingungen werden also noch durch die Bodenart modifiziert und bieten damit Anhaltspunkte für die Anbaubedingungen vor Ort. In Abbildung 2.4.2 ist eine Verschneidung von Bodeneigenschaften und dem Klima vorgenommen worden, wobei Gebiete mit ähnlichen Eigenschaften zu sogenannten Boden-Klima-Räumen zusammengefasst wurden.

Die Aggregation dieser Anbauggebiete dient aber vornehmlich dem Zweck, Ergebnisse von Sortenversuchen und Sortenempfehlungen in einen regionalisierten bzw. anbaugiebtspezifischen Zusammenhang stellen zu können.

Zudem kann für jede Feldfruchtart eine erneute Aggregation von Bodenklimarräumen in Abhängigkeit von der Anbaubedeutung der Kulturen vorgenommen werden. Die Ausweitung von fruchtartspezifischen Anbaugebieten soll dazu beitragen, über ein neues biometrisches Verfahren die regionale Auswirkung der Sortenversuchsergebnisse in dynamisch überlappenden Anbaugebieten weiter zu verbessern.

Leichte Böden haben mehr Lufteinschlüsse und leiten Wärme schlechter → größere Tagestemperaturamplitude in den oberen Schichten.

## 2.5 Phänologie

In den vorangegangenen Abschnitten wurde schon mehrmals auf die bereits messbaren Veränderungen des Klimas eingegangen. Im Rahmen des Klimawandels steht vor allem die Zunahme der Temperatur im Fokus. Im Paris-Abkommen der Klimakonferenz der Vereinten Nationen von 2015 ist es das erklärte Ziel, die Erhöhung der globalen Mitteltemperatur auf unter 2 °C, wenn möglich auf 1,5 °C im Vergleich zum vorindustriellen Niveau zu begrenzen (UN, 2015)

Die Änderung der globalen Mitteltemperatur wirkt sich nicht in jeder Region gleich aus. Die stärksten Temperaturänderungen werden für die gemäßigten und höheren Breiten erwartet. Seit 1881 hat die Jahresmitteltemperatur in Deutschland um 1,4 °C zugenommen (Abb. 2.5.1). Die beiden bisher wärmsten Jahre seit Beobachtungsbeginn sind 2014 (10,3 °C) und 2015 (9,9 °C).

Im Bereich der Agrarmeteorologie sind vor allem die Bedingungen in der Vegetationsperiode von Interesse, denn durch die Temperatur und die Tageslänge werden viele Prozesse der Pflanzen gesteuert. Durch sogenannte phänologische Beobachtung wird das zeitliche Auftreten einzelner Pflanzenpha-

BKR-Nummer	BKR-Bezeichnung	BKR-Nummer	BKR-Bezeichnung
127	Mittellagen Rheinland-Pfalz und Saarland	152	Niedersächsisches Küsten- und Elbmarsch
128	Hunsrück, Westerwald	153	Geest – Süd
129	sandiger Lehm / Eifel / Höhenlagen	154	südliches schleswig-holsteinisches Hügelland
130	Odenwald, Spessart	155	Marsch – Nord
132	Osthessische Mittelgebirgslagen	156	Geest – Nord
133	Zentralhessische Ackerbaugebiete, Warburger Börde	157	nördliches schleswig-holsteinisches Hügelland
134	Lehmböden / Sauerland, Briloner Höhen / Höhenlagen	158	Nordwest-Mecklenburg / Rügen / Südost-Holstein
141	Lößböden / Köln-Aachener Bucht / Niederungslagen	191	Teutoburger Wald
142	Lehmböden / oberer Mittelrhein, Niederrhein, südliches Münsterland / Niederungsanlagen	192	Harz
143	Lehmböden / Ost-Westfalen, Haarstrang, Bergisches Land, Voreifel / Übergangslagen	193	Rhön
145	Lehmböden / Südhannover	194	Thüringer Wald
146	sandige Böden / Lüneburger Heide, nördliches NRW	195	Erzgebirge
147	leichte Lehmböden / mittleres Niedersachsen, nordöstliches NRW	196	Bayrischer Wald
148	Sandböden / südwestliches Weser-Ems-Gebiet, nördliches Münsterland / Niederungsanale	198	Schwarzwald
150	nordwestliches Weser-Ems-Gebiet / sandige Böden	199	Alpen
151	Elbe-Weser-Dreieck / sandige Böden		

zusätzliche Boden-Klima-Räume	
103	Niederungsstandorte NO-Deutschland (überwiegende Moore)
160	Moore Nordwest-Deutschland

(Diese Standorte liegen kleinräumig und/oder nicht in Ackerbau-BKR und werden deshalb „kartenmäßig“ nicht dargestellt.)

Abb. 2.5.1: Entwicklung der Jahresmitteltemperatur 1881 bis 2100 für Deutschland (DWD Deutscher Klimaatlas, 2016).

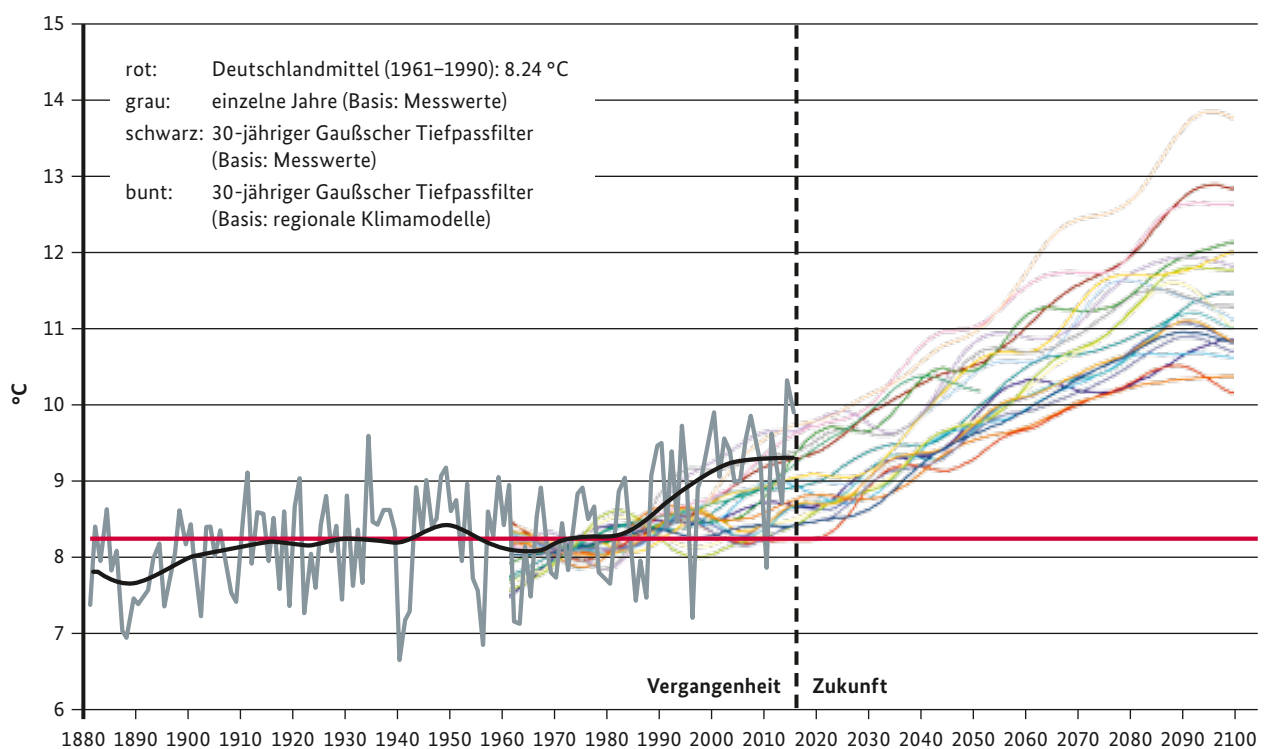
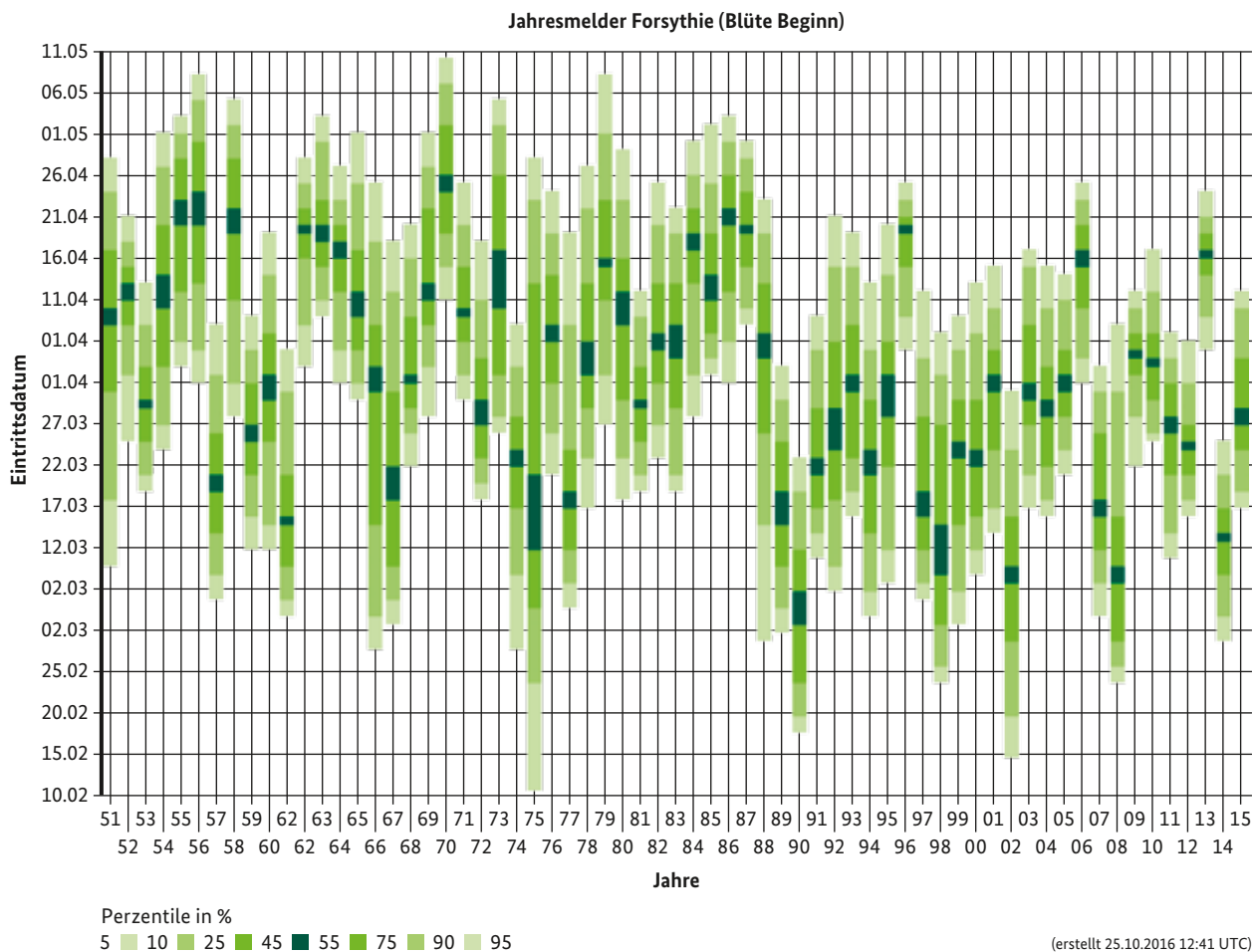


Abb. 2.5.2: Jährliche Verteilung von allen Beobachtungen des Blühbeginns der Forsythie in Deutschland in den Jahren 1951 – 2015.



sen dokumentiert. Viele Pflanzenphasen reagieren stark auf Temperaturen, so dass phänologische Beobachtungen ideale Indikatoren für Klimaänderungen sind. In den vorherigen Kapiteln wurde schon erwähnt, dass sich besonders im Frühjahr starke Veränderungen ergeben haben, darum soll anhand des Blühbeginns der Forsythie gezeigt werden, wie die Vegetation auf die Temperaturzunahme reagiert hat.

Für jedes Jahr sind verschiedene Termine angegeben, an denen eine vorgegebene Prozentzahl aller Beobachtungen aus dem phänologischen Messnetz eingegangen ist. Augenscheinlich variiert der Meldeverlauf von Jahr zu Jahr stark und zieht sich teilweise über mehrere Monate hin. Kalte Jahre zeichnen sich durch spät beginnende Meldungen aus, die in der Regel in einem vergleichbar kleinen Zeitfenster beobachtet werden. Jahre, in denen die Beobachtungen früh beginnen und sich über einen langen Zeitraum erstrecken, sind durch Kälteeinbrüche im Frühjahr geprägt. Durch die Trendlinien bei der Temperaturerhöhung wird immer von einem langsamen jährlichen Anstieg der Temperaturen ausgegangen und leicht die große jährliche Variabilität, die eindrucksvoll in Abbildung 2.5.2 gezeigt wird, vergessen. So gab es in der Vergangenheit bereits Jahre, die in Zukunft Normalität sein werden und schon jetzt zeigen, wie Pflanzen darauf reagieren.

Es ist ein starker Bruch im Jahre 1988/89 zu früheren Beobachtungsterminen festzustellen, wobei im Mittel eine Verfrühung um ca. 14 Tage festgestellt werden kann. Dieser markante Bruch lässt sich nahezu bei allen Phasen, selbst den durch Sortenauswahl beeinflussten Kulturpflanzen im Frühjahr beobachten. So wird das Schossen beim Winterweizen im Mittel ebenfalls 14 Tage früher um den 26.4. beobachtet. Diese Verfrühung setzt sich bis zum Sommer fort, wo die Gelbreife des Winterweizens im Mittel 15 Tage früher (im Mittel um den 20.7.) beobachtet wird.

Die Zeitfenster für die Beobachtungen werden zum Sommer geringer, die Kulturen reagieren dabei recht unterschiedlich. So verändert sich die Zeitspanne Blüte und Fruchtreife beim Holunder nicht merklich, doch beide Phasen werden nun im Mittel 11 Tage früher beobachtet. Beispielhaft zeigt Abb.2.5.3 die Entwicklung der Phasen vom Apfel in Geisenheim/Rheingau. Bei allen Phasen tritt eine Verfrühung über die gesamte Zeitspanne von 1951 bis 2015 auf, wobei die erhöhten Temperaturen besonders bei den spätreifenden Sorten die stärkste Verfrühung mit 28 Tagen bringen. Die Trendlinie der Fruchtreife der frühen Sorten zeigt nur eine geringe Änderung, denn bei dieser Phase fällt die Verfrühung trotz erhöhter Temperaturen schwächer als bei der Vollblüte aus.

Abb. 2.5.3: Einsetzen der Vollblüte sowie der Fruchtreife für frühe und späte Apfelsorten in Geisenheim 1951-2015.

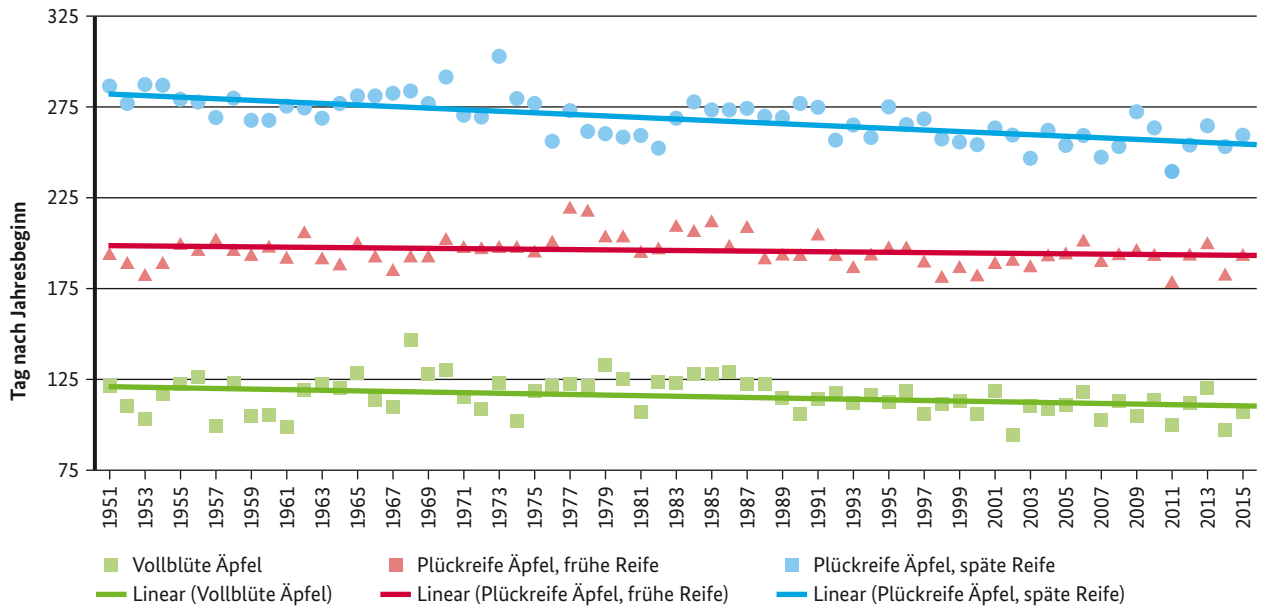
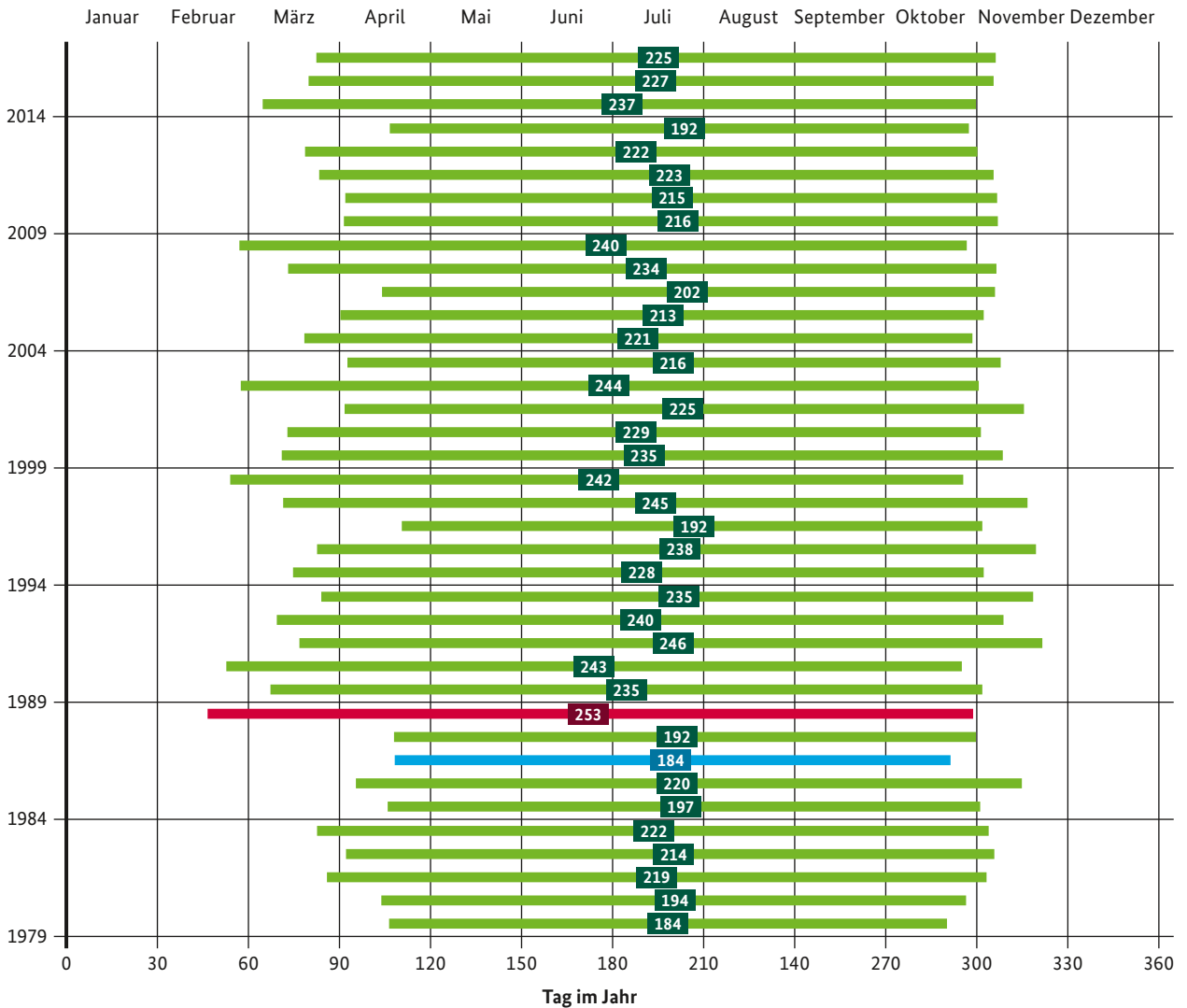


Abb. 2.5.4: Beginn (Forsythie: Beginn der Blüte), Dauer (in Tagen) und Ende (Stiel-Eiche: Blattfall) der Vegetationsperiode, Standort Braunschweig 1979-2016.



Bei den Herbstphasen wildwachsender Pflanzen sind keine signifikanten Veränderungen gegenüber früheren Jahren festzustellen. Dies liegt hauptsächlich daran, dass diese Phasen bei vielen Pflanzen auch durch die Tageslänge gesteuert werden. Auch nur kurz auftretende tiefere Temperaturen lösen z. B. die Blattverfärbung und den Blattfall aus, auch wenn nachfolgend noch wärmere Bedingungen herrschen (Gömann et al., 2017).

Der Blühbeginn der Forsythie oder die Blattentfaltung der Stachelbeere ist die Zeigerphase für den Vegetationsbeginn, während der Blattfall der Stieleiche das Ende der Vegetation angibt. Als Differenz zwischen beiden Phasen ergibt sich die Länge der Vegetationsperiode, die in Abbildung 2.5.4 dargestellt ist.

Das Ende der Vegetationszeit variiert weniger stark über die Jahre und ist nahezu gleich geblieben, so dass sich die Vegetationszeit im Mittel seit 1988 um 14 Tage verlängert hat.

Die Klimamodelle geben den Hinweis, dass sich die beobachteten Entwicklungen weiter fortsetzen werden.

- im Frühjahr: deutliche Verfrühung bei vielen Pflanzenphasen aufgrund der höheren Temperaturen
- markanter Wechsel seit 1989 festzustellen
- im Herbst: kaum Veränderungen in den beobachteten Phasen → längere Vegetationsperiode

## Literatur

Gömann, H., Frühauf, C., Lüttger, A., Weigel, H.-J. (2017): Landwirtschaft. In: Guy P. Brasseur, Daniela Jacob, Susanne Schuck-Zöller (Hrsgs): Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. ca. 350 S., über 100 Abb., Berlin Heidelberg. DOI 10.1007/978-3-662-50397-3\_18.

Graf, R., Michel, V., Roßberg, D., Neukampf, R. (2009): Definition pflanzenartspezifischer Anbauggebiete für ein regionalisiertes Versuchswesen im Pflanzenbau. Journal für Kulturpflanzen 61 (7), 247-253

Mohr, H., Schopfer, P. (1978): Lehrbuch der Pflanzenphysiologie. 3. Aufl., Berlin/Heidelberg/New York, S. 220.

Roßberg, D., Michel, V., Graf, R., Neukampf, R. (2007): Definition von Boden-Klima-Räumen für die Bundesrepublik Deutschland. Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes 59 (7), 155-161.

Todt, T. (1984): Die Erwärmung der obersten Bodenschichten im Frühjahr auf verschiedenen Standorten. Meteorol. Rdsch. 38, 97-102.

UN (2015): United Nations, Framework Convention on Climate Change, Conference of Parties 30.11.-12.12.2015, Paris Agreement Document FCCC/CP/2015/L.9, Annex Article 2



### 3 Agrarmeteorologische Kernparameter – ihre Bedeutung und Messung

*Autoren: Klaus-Peter Wittich, Torben Meinert*

Neben der Fülle der Parameter, die das meteorologische Geschehen in der Atmosphäre beschreiben (wie Lufttemperatur, Luftdruck, Niederschlag, Windgeschwindigkeit, usw.), gibt es einige Mess- bzw. Beobachtungsgrößen, die im Zusammenhang mit der Landwirtschaft von Belang sind. Hierzu gehören Bodentemperatur und -feuchte, Verdunstung, Tau und Blattbenetzung.

### 3.1 Bodentemperatur und Frosteindringtiefe

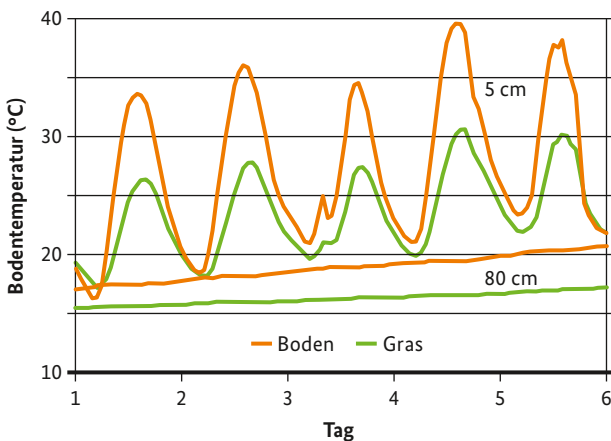
Die Bodentemperatur gehört zusammen mit der Bodenfeuchte (s. Abschnitt 3.2) zu den landwirtschaftlich wichtigsten Parametern. Sie beeinflusst – in Wechselwirkung mit der Tageslänge (Photoperiode) – sowohl die Entwicklungsgeschwindigkeit als auch die Vitalität der Pflanzen.

Angetrieben durch die Strahlungsverhältnisse bildet sich ein sinusförmiger Tagesgang aus, wobei an der Bodenoberfläche die größte Temperaturvariabilität im Tagesverlauf zu finden ist. Mit zunehmender Bodentiefe verringert sich die Temperaturschwingung, so dass in ca. 1 m Tiefe der Tagesgang nicht mehr nachweisbar ist. Temperaturmessungen im Keimhorizont eines unbewachsenen Bodens zeigen im Vergleich zu jenen unter einer Vegetationsdecke stärkere Amplituden (s. **Abb. 3.1.1**). Aus diesem Grund ist das Saatgut im Keimhorizont eines frisch bestellten Bodens einer stärkeren Beeinflussung durch Wärme und Kälte ausgesetzt als bei einer Mulchsaat.

Sinkt die Bodentemperatur unter 0 °C, beginnt das Bodenwasser zu gefrieren, was nicht nur die Wasseraufnahme der Pflanzen, sondern auch deren Aufnahme von Flüssigdünger behindert. Aus diesem Grund ist das Ausbringen von stickstoff- und phosphathaltigen Nährstoffen auf gefrorenem oder schneebedecktem Boden untersagt (s. §5 der Düngeverordnung 2017).

Zum anderen schädigen tagesperiodische Wechselfröste, d.h. tagsüber auftauende und nachts gefrierende Böden, die Wurzeln, da die mit der Änderung des Bodenvolumens einhergehende Bodenbewegung die Wurzeln reißen lässt. Schließlich wirkt sich Bodenfrost in Verbindung mit Luftfrost (Tagesmittel der Lufttemperatur in 2 m Höhe ist kleiner als 0 °C) schädigend auf die Kulturen aus. So tolerieren z.B. Winterweizen und -gerste keine längeren Fröste unter -10 °C über schneefreiem Boden (Gömann et al., 2015).

**Abb. 3.1.1: Tagesperiodische Bodentemperatur in 5 cm Tiefe und nahezu linearer Temperaturverlauf in 80 cm Tiefe im unbewachsenen Boden (orange) und unter Gras (grün). Messperiode: 1.-5. Juli 2015, Messort: Braunschweig.**

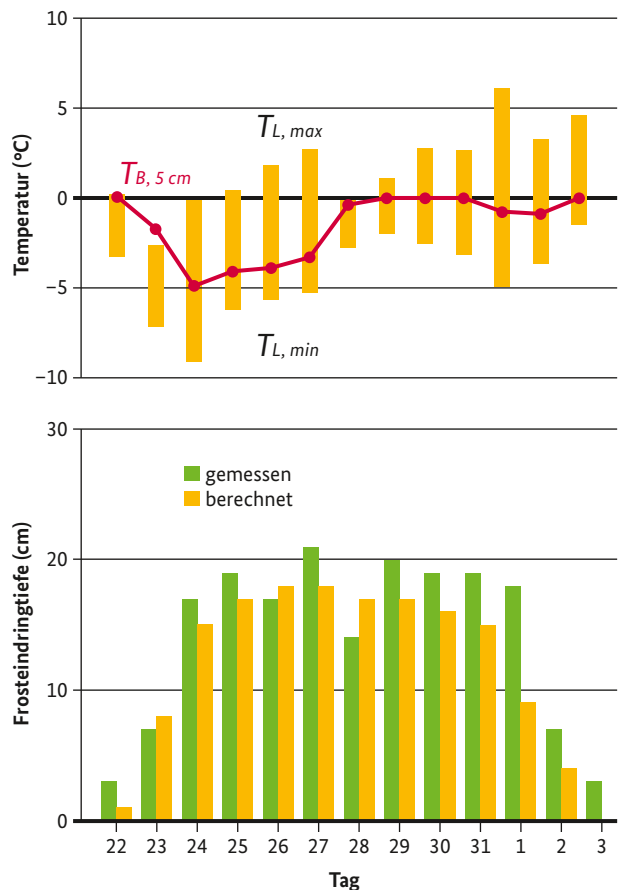


**Abb. 3.1.2 (oben)** veranschaulicht die zeitlichen Gänge der Lufttemperatur und der Temperatur des Oberbodens während einer Kältephase am Ende des Vorfrühlings 2013. Bis zum 22. März lag der Boden zeitweise unter einer frosthaltenden Schneedecke. Die Folgetage waren schneefrei, jedoch führte vorherrschende Kaltluft zu Bodenfrost, der bis in eine Tiefe von ca. 20 cm eindrang (**Abb. 3.1.2 unten**). Mildere Witterung sorgte erst Anfang April zum Abklingen der Frosteinwirkung.

**Abb. 3.1.2 (unten)** zeigt neben gemessenen auch berechnete Bodenfrosteindringtiefen, wobei eine recht enge Parallelität der Zeitreihen sichtbar wird. Die berechneten Werte basieren auf einem boden- und bestandsklimatischen Modell des DWD's (s. Kapitel 4.4), welches unter anderem auch zur Bodenfrostprognose eingesetzt wird.

Anhand einfacher Profilmessungen der Bodentemperatur kann die Frosteindringtiefe aus der Lage des 0°C-Wertes bestimmt werden. Hierzu muss allerdings das Temperaturprofil in hoher vertikaler Auflösung vorliegen, um die Frostgrenze möglichst genau zu erfassen. Die Messungen erfolgen in der Regel elektronisch mithilfe von Widerstandsthermometern (siehe **Abb. 3.1.3**).

**Abb. 3.1.2: Bodentemperatur in 5 cm Tiefe um 6 Uhr MEZ ( $T_B$ , rote Punkte, oben), Maximum-Minimum-Spanne der Lufttemperatur in 2 m Höhe ( $T_L$ , orange Balken, oben), und Frosteindringtiefe im unbewachsenen Boden (unten). Messperiode: 22. März bis 3. April 2013, Messort: Braunschweig.**





Alternativ lassen sich Frosteindringtiefen durch Entnahme eines Bodenzylinders mittels Bohrstock erfassen (Abb. 3.2.1), wobei Härtezustand der Säule und Eiskristalleinlagerung auf Frostbildung schließen lässt. In der Agrarmeteorologie des DWD wird jedoch ein magnetbasiertes Messsystem bevorzugt. Dieses besteht aus einer Doppelröhre aus Kunststoff (Durchmesser: je 12 mm), die im Herbst vertikal bis in eine Bodentiefe von 80 cm eingebracht wird und dort die frostrelevanten Monate verbleibt. Eine der Röhren ist mit destilliertem Wasser gefüllt. An ihrem unteren Ende befindet sich ein frei beweglicher Magnet, der durch einen Magnetfuß eines vertikalen Messstabes, der in der benachbarten Parallelröhre eingeführt ist, nach oben bewegt werden kann, bis er an das untere Ende der gefrorenen Wassersäule stößt. Die Stab- bzw. Magnetposition lässt sich an einem Messband ablesen (Abb. 3.1.3).

Messungen der Frosteindringtiefe zeigen, dass unter vegetationsbedeckten Flächen eine geringere Frosttiefe zu erwarten ist als unter vegetationsfreien Flächen. Grund ist, dass die organische Substanz (z.B. Pflanzenmaterial, Mulch, Stroh, usw.) aufgrund ihrer schlechteren Wärmeleitfähigkeit (s. Tabelle 3.1) und daher stärkeren Isolationswirkung sowohl das Eindringen der Kaltluft in den Boden als auch die Abgabe der Bodenwärme an die Atmosphäre dämpft. Zudem weist organische Substanz eine etwas höhere Wärmekapazität (d.h. Wärmespeicherung) als mineralischer Boden auf. Wasser zeigt einen deutlich höheren Wert, so dass durchnässte Böden, wie z.B. Moor, geringere Eindringtiefen erlauben, zumal während des Gefriervorgangs des Bodenwassers Gefrierwärme freigesetzt wird, die der frostinduzierten Temperaturabsenkung zunächst entgegenwirkt.

Tab 3.1: Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität verschiedener BodenkompONENTEN (aus Campbell, 1985).

Material	Wärmeleitfähigkeit W/(m K)	Wärmekapazität MJ/(m <sup>3</sup> K)
Ton	2,92	2,39
Organ. Substanzen	0,25	2,50
Wasser	0,57	4,18
Eis	2,18	1,73
Luft	0,025	0,0012

Abb. 3.1.4: Zeitgleiche Messung der Frosteindringtiefe in verschiedenen Kulturen und Böden (Messort: Braunschweig, 14.2.2012).

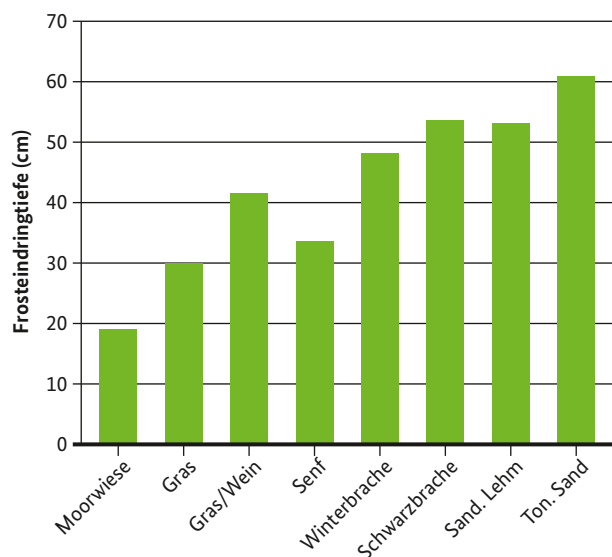


Abb. 3.1.3: Elektronischer Bodentempersensor (Platin-Widerstandsthermometer) und magnetisches Verfahren zur Bestimmung der Frosteindringtiefe (Fotos: Falke/DWD-ZAMF).

**Abb. 3.1.4** veranschaulicht Frosteindringtiefen auf acht datumsgleich beprobten Flächen: Die eingezeichneten Messdaten wurden am Ende einer 19-tägigen Periode mit Luftfrost erfasst. Während der Frost in einer Moorwiese lediglich bis 20 cm Tiefe nachweisbar war, drang er in einem tonigen Sandboden über 60 cm tief ein. Mächtigere Frostschichten werden in Deutschland selten erreicht, was unter anderem auch an lockeren Schneedecken liegen kann, die aufgrund der Lufteinschlüsse isolierend wirken und das Eindringen des Frostes in den Boden dämpfen.

### 3.2 Bodenfeuchte

Für Ertragssicherheit und Ertragsqualität ist vor allem die Wasserversorgung der Kulturen und damit die Bodenfeuchte entscheidend. Eine Quantifizierung des Bodenwassergehalts erfolgt üblicherweise in der Einheit „Volumen-Prozent“ oder „Wasservolumen (in m<sup>3</sup>) pro Bodenvolumen (in m<sup>3</sup>)“, kurz „m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>“. Die Angabe dieses *volumetrischen* Wassergehaltes ist allerdings sehr grob, da sie keine Aussage über die Fähigkeit des Bodens zulässt, das in ihm enthaltene Wasser zu binden.

Je nach Partikelgröße und Luftvolumen (bzw. Korngrößenfraktion und Lagerungsdichte), und je nach Bodenzusammensetzung und Durchwurzelungsintensität kann die Bindungsenergie der Wassermoleküle sehr unterschiedlich sein. Deshalb sind Wassergehalte unterschiedlicher Böden erst dann aussagekräftig, nachdem sie mittels bodenartspezifischer Kardinalwerte in eine gemeinsame Skala umgerechnet wurden. Als Kardinalwerte für diese Skala dienen der *Welkepunkt* (*Wp*) und die *Feldkapazität* (*Fk*). Der Welkepunkt ist definiert als diejenige Wassergehaltsschwelle, unterhalb derer die Saugkraft der Pflanzenwurzeln nicht mehr ausreicht, um Wasser aus den Poren des Bodens zu ziehen, so dass die Pflanze zu welken beginnt. Dagegen wird unter Feldkapazität jener Wassergehalt verstanden, der nach einem ergiebigen Niederschlag zum Zeitpunkt erlöschender Sickerung anzutreffen ist. Dieser Zustand stellt sich ca. zwei Tage nach Wassersättigung ein, wenn die Saugwirkung des Bodens und die Schwerkraft des Wassers sich gerade ausgleichen.

**Tab. 3.2: Bodenkardinalwerte und Körnungsdurchmesser für die drei Hauptbodenarten (Sand, Schluff, Ton) und die weit verbreitete Bodenart schwach sandiger Lehm. Hinweis: In der Literatur werden, je nach Textur, zum Teil etwas abweichende Kardinalwerte angegeben.**

Bodenart	Feldkapazität (Vol.-%)	Welkepunkt (Vol.-%)	Korngrößenfraktion (mm)
Sand	19,54	2,95	0,06–2,00
Schluff	38,72	11,07	0,002–0,06
schwach sandiger Lehm	34,58	16,94	ca. 0,01 (mittlerer Durchmesser)
Ton	40,65	29,35	< 0,002

In einer 10 cm tiefen Bodensäule entspricht eine Bodenfeuchte von 1 Volumenprozent (0,01 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>) einer Wasserhöhe von 1 mm.

Die Kardinalwerte werden maßgeblich durch die Partikelgröße des Bodens bestimmt. Für Sand-, Schluff-, Lehm- und Tonböden sind in **Tabelle 3.2** neben ihren typischen Körnungsdurchmessern die Feldkapazität und der Welkepunkt angegeben.

Prinzipiell sind alle Wassergehalte zwischen der Feldkapazität und dem Welkepunkt von der Pflanze nutzbar. Insofern wird die Differenz beider Größen als *nutzbare Feldkapazität* (*nFk*) bezeichnet ( $nFk = Fk - Wp$ ). Das aktuell pflanzenverfügbare Wasser ist dagegen die Differenz zwischen dem aktuellen Bodenwassergehalt *w* und dem Welkepunkt. Wird das pflanzenverfügbare Wasser auf die nutzbare Feldkapazität bezogen, erhält man die Bodenfeuchte in „Prozent *nFk*“, also:

$$W_{\%nFk} = 100 \times \frac{W - W_{Wp}}{W_{fk} - W_{Wp}}$$

wobei die Größen auf der rechten Gleichungsseite in Vol.-% (bzw. m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>) einzusetzen sind.

Die Bodenfeuchte kann auf 0 % nFk fallen, wenn aufgrund langandauernder Trockenheit der Welkepunkt erreicht wird. Dagegen erreicht die Bodenfeuchte den Wert 100 % nFk, sobald ausreichende Niederschläge den Wassergehalt auf das Niveau der Feldkapazität steigen lassen.

Fällt das Niederschlagsereignis noch ergiebiger aus, beginnt das überschüssige Bodenwasser zu versickern. Sind die tieferen Bodenschichten bereits derart durchnässt, dass das Sickerwasser nicht mehr aufgenommen werden kann, staut sich das Niederschlagswasser im Oberboden und führt dort zur Wassersättigung bzw. -übersättigung. Im Fall der Sättigung sind alle Bodenhohlräume mit Wasser gefüllt, im Fall der Übersättigung beginnen sich Wasserlachen zu bilden.

Spätestens sobald die Feldkapazität überschritten wird, herrscht Sauerstoffmangel, der das Pflanzenwachstum beeinträchtigt.

Während wichtiger physiologischer Entwicklungsabschnitte gilt es, Wasser- und Nährstoffmangel zu vermeiden. Stets ergänzt durch eine Vor-Ort-Diagnose tragen vom DWD prognostizierte nFk-Angaben des Wassergehalts dazu bei, eine Entscheidung über die Notwendigkeit der Feldberegnung zu treffen, sofern die beregnungstechnischen Voraussetzungen dafür gegeben sind. Unterstützend bietet der DWD kulturspezifische mehrtägige Beregnungsprognosen an (siehe Abb. 6.4.6).

Feldversuche haben gezeigt, dass es im Mittel der Jahre ausreichend ist, Kulturen während kritischer Phasen des Wasserbedarfs erst dann zu beregnen, wenn 30 – 50 % der nutzbaren Feldkapazität unterschritten worden sind (Renger und Strebel, 1980). Bei bereits eingetretenen ersten Wachstumsverzögerungen können jedoch die anschließend einzuhaltenden nFk-Schwellen auch höher liegen (Michel und Günther, 2014).

Neben bodenphysikalischen Kenngrößen spielt für die aktuelle Höhe der Bodenfeuchte auch das Transpirationsvermögen der Pflanzen eine wichtige Rolle. Die über die Blätter an die Atmosphäre abzugebende Wassermenge (als Verlustgröße des Bodenwasserhaushalts) hängt vom Entwicklungsstand der Kultur, der Gesamtblattfläche, der Wurzelverteilung und weiteren pflanzenphysiologischen Parametern ab.

Insofern sollte die Angabe der Bodenfeuchte stets mit einem Bezug auf Bodenart und -tiefe sowie Kultur (bzw. deren phänologischem Entwicklungsstadium) versehen werden.

Um die Bodenfeuchte möglichst genau zu bestimmen (entsprechend der Definition des volumetrischen Wassergehalts), eignet sich die gravimetrische Messung mit anschließender Umrechnung in Volumenanteile. Hierzu wird mit einem Bohrstock ein definiertes Bodenvolumen entnommen (Abb. 3.2.1) und anschließend 24 Stunden bei ca. 105 °C getrocknet. Anschließend wird die Gewichtsänderung zum Frischgewicht bestimmt. Die Differenz entspricht dem Gewicht des entzogenen Wassers. Division durch die Wasserdichte ( $1 \text{ g/cm}^3$ ) führt auf das Bodenwasservolumen. Wird dieses durch das Bodenvolumen dividiert, ergibt sich die Bodenfeuchte in der Einheit Vol.-%.

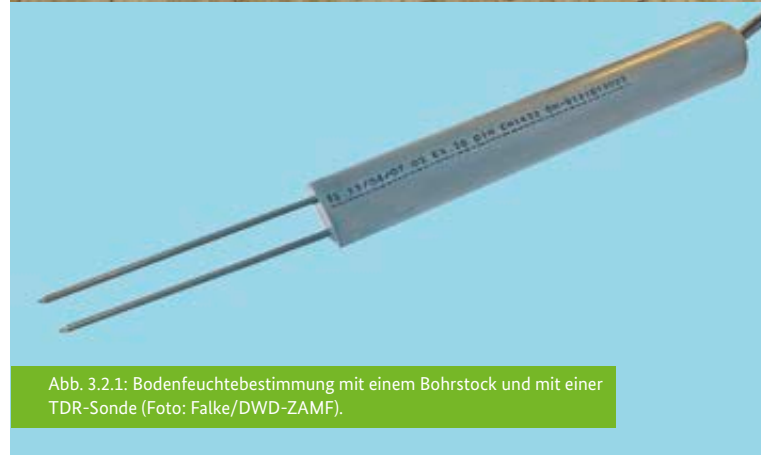
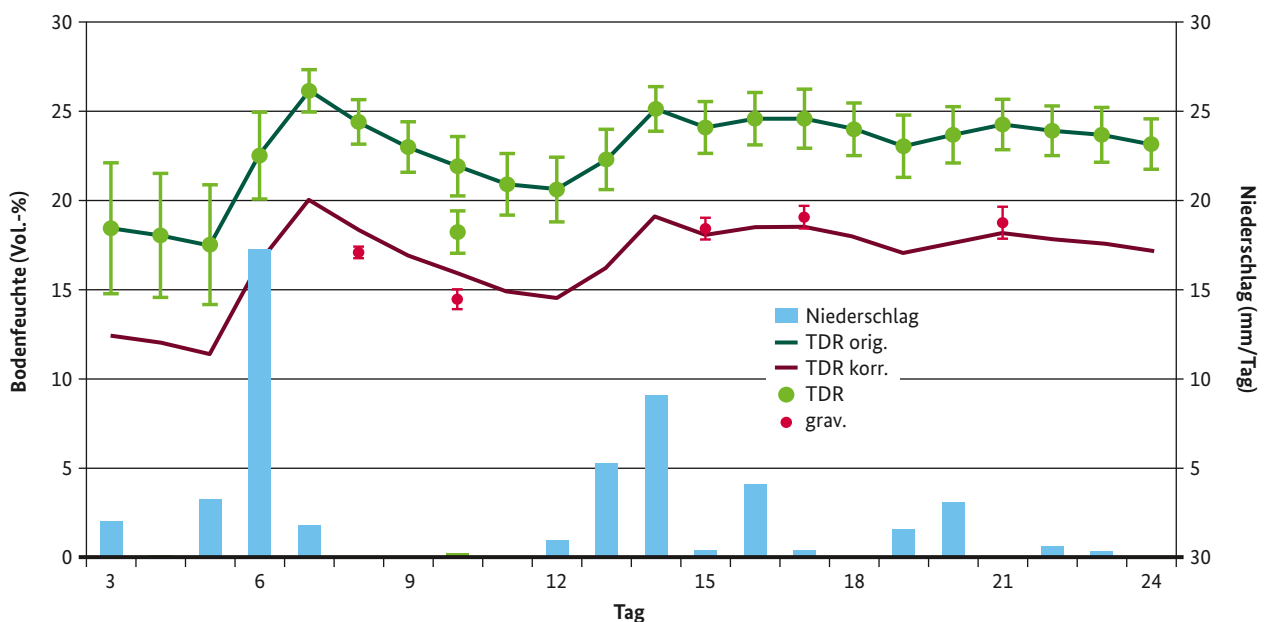


Abb. 3.2.1: Bodenfeuchtebestimmung mit einem Bohrstock und mit einer TDR-Sonde (Foto: Falke/DWD-ZAMF).

Abb. 3.2.2: Mittägliche elektronische Messung der Bodenfeuchte mit TDR-Sonden (grüne Punkte) und gravimetrische Messung mit dem Bohrstock (rote Punkte) in der obersten 10cm-Schicht eines unbewachsenen Sandbodens (Braunschweig, September 2015). Die beidseitigen Vertikalstriche an den Kreisen geben die Standardabweichung (Messunsicherheit) auf Basis der Messwiederholungen an. Die lila TDR-Kurve ergibt sich aus einer Verschiebung der Originaldaten. Die vertikalen blauen Balken kennzeichnen 24-stündige Niederschlagssummen.



Infolge des Zeitaufwandes des manuellen Verfahrens ist allerdings kaum ein zeitlich hochauflösender Datensatz zu erhalten. Die gravimetrische Methode dient deshalb eher als Referenz für andere Messmethoden bzw. zur sporadischen Überprüfung theoretischer Bodenwassersimulationen (s. Kapitel 4.4). Der Nutzen der hierfür eingesetzten Berechnungsmodelle liegt darin, dass nicht nur Zeitreihen der Vergangenheit erstellt werden können, sondern auch der Zukunft, die – auf Basis der numerischen Wettervorhersage – frühzeitige Hinweise auf die Beregnungsbedürftigkeit der Kulturen erlauben (s. Friesland und Löpmeier, 2007).

Um Bodenwassergehalte in hoher zeitlicher Auflösung zu erfassen, ist es heute üblich, TDR (Time Domain Reflectometry)-Sonden einzusetzen (Abb. 3.2.1). Sie messen bodenfeuchteabhängige Laufzeiten elektronischer Impulse entlang von zwei oder drei stabförmigen Leitern. Sinnvoll sind derartige Messungen nur in ungestörten, „gewachsenen“ Böden, die keiner landwirtschaftlichen Bearbeitung unterliegen (z.B. Dauergrünland). Zudem zeigt die technische Erfahrung mit TDR-Sonden, dass Absolutwerte der Bodenfeuchte nicht sehr genau erfasst werden und generell einer Überprüfung bedürfen. Eine Messung innerhalb vegetationsfreien Sandbodens veranschaulicht dieses Problem (Abb. 3.2.2). So wurde ein Versatz von bis zu 6 Vol.-% zwischen TDR-Messung und gravimetrischer Bodenfeuchtebestimmung festgestellt. Absolute Fehler in der Größenordnung von  $\pm 2$  Vol.-% gelten als üblich.

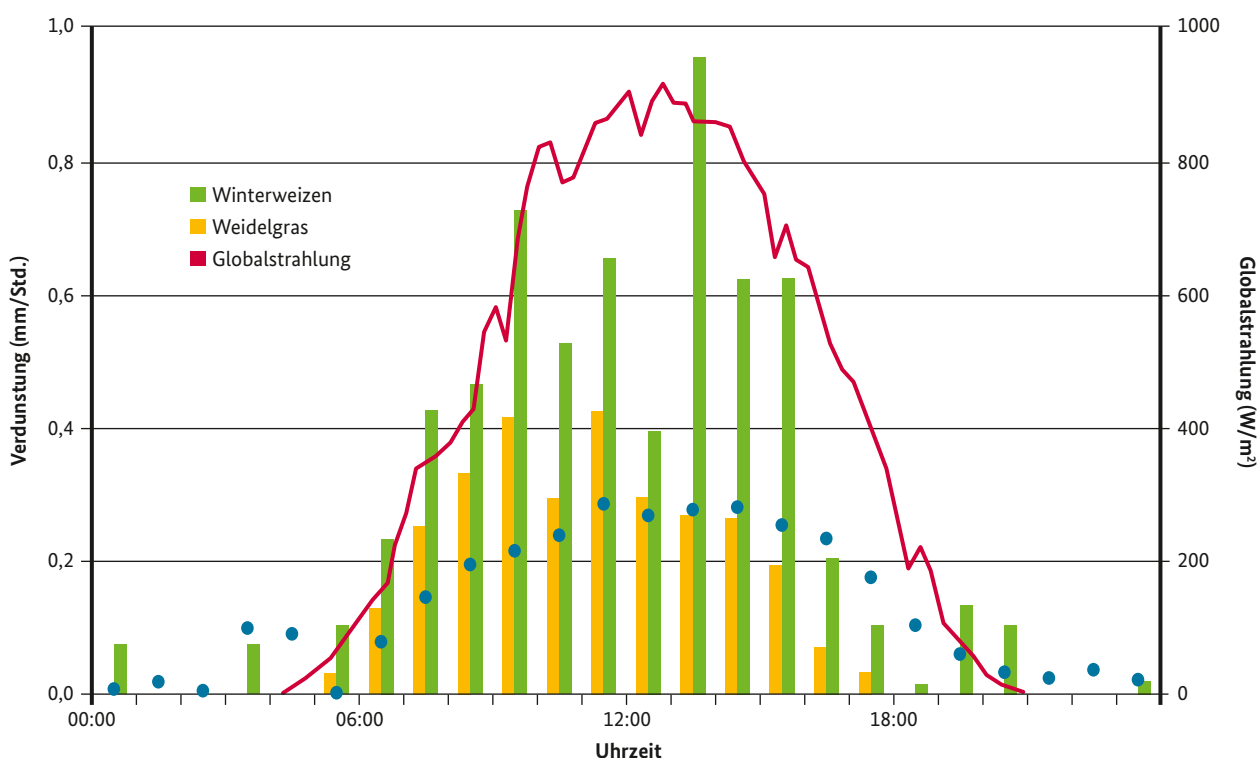
### 3.3 Verdunstung

Verdunstung gilt als versteckte Größe unter den agrarmeteorologischen Parametern, da sie nicht wie die Temperatur gefühlt oder wie der Niederschlag unmittelbar beobachtet werden kann (mit Ausnahme allmählich verschwindender Wassertropfen auf Blättern, o.ä.). Dennoch beeinflusst der Verdunstungsprozess eine Reihe anderer Parameter, etwa die Bodenfeuchte, und greift damit unbemerkt in viele landwirtschaftliche Maßnahmen ein, wie z.B. die Terminierung der Feldberegnung.

Die im Tagesverlauf akkumulierende Verdunstungsmenge eines gut wasserversorgten Bestandes besitzt eine energetische Obergrenze, die vom Strahlungsangebot, von der Lufttemperatur, der relativen Luftfeuchte sowie der Windgeschwindigkeit abhängt. Generell wirken intensive Sonnenstrahlung (als Hauptantrieb des Prozesses), hohe Temperatur und starker Wind verdunstungsfördernd, hohe Luftfeuchte dagegen verdunstungshemmend.

Über die atmosphärischen Bedingungen hinaus übt der Bestand durch seine geometrische Struktur selbst einen Einfluss auf die Verdunstung aus. Denn je nach Höhe und Abstand der Einzelpflanzen wird die Bildung energietragender Turbulenzelemente innerhalb der bestandsnahen Strömung mehr oder weniger begünstigt und damit der Wasserdampf-

**Abb. 3.3.1: Stündliche Verdunstungsmengen (Balken) von Winterweizen (grün) und Weidelgras (orange), gemessen mit Lysimetern (7. Juni 2015, Braunschweig). Der Weizenbestand wurde zwei Tage zuvor beregnet und zeigt deshalb deutlich höhere Verdunstungswerte als Weidelgras. Die eingezeichneten blauen Kreise sind Messwerte eines Gasanalysers, der 100 m entfernt über einem weiteren Winterweizenbestand installiert war. Dieser Bestand litt unter deutlichem Wasserstress und lieferte deshalb weniger hohe Verdunstungswerte.**



transport in die bodennahe Atmosphäre entsprechend angeht. Zudem kann der Bestand durch tieferes bzw. dichteres Wurzelwachstum dem Boden vermehrt Wasser entziehen und bei entwicklungsbedingtem Blattflächenzuwachs vermehrt Wasser an die Atmosphäre abgeben.

**Abb. 3.3.1** ist zu entnehmen, dass Verdunstungsprozesse überwiegend unter Tageslichtbedingungen ablaufen. Während der Nachtphase kann infolge des fehlenden Strahlungsantriebs lediglich eine trockene Luftmasse und stärkerer Wind als Ursache für Verdunstung in Frage kommen (hier nicht dargestellt).

Unterschieden wird zwischen *potenzieller* und *aktueller* (d.h. *realer*) Verdunstung (s. Schrödter, 1985). Die *potenzielle* Verdunstung stellt das energetische Verdunstungsmaximum eines Bestandes dar und basiert auf der Annahme, dass stets eine optimale Wasserversorgung, d.h. ausreichende Bodenfeuchte, gewährleistet ist.

Insofern wird die potenzielle Verdunstung überwiegend von der Atmosphäre durch Strahlung, Lufttrockenheit, Windbewegung und Lufttemperatur kontrolliert, und nur zu einem geringeren Teil von der Kulturart und deren Bestandsstruktur (bzw. deren Turbulenzerzeugung) selbst beeinflusst.

In unseren gemäßigten Breiten liegt die *potenzielle* – d.h. atmosphärisch maximal mögliche – Verdunstung unter günstigen sommerlichen Bedingungen (Strahlungswetter) bei ca. 8 mm pro Tag.

Für den *aktuellen* (*realen*) Verdunstungsprozess spielt dagegen die Wasserversorgung des Bestandes eine entscheidende Rolle. Um eine ungehinderte Verdunstung zu gewährleisten, sollte der Wassergehalt des Bodens oberhalb von ca. 80 % nFk liegen, andernfalls reduziert sich die Verdunstungsleistung. Je niedriger die Bodenfeuchte ist, umso mehr unterschreitet die aktuelle Verdunstung den potenziellen Wert und kann im Extremfall, wenn der Boden im Fall einer Dürre ausgetrocknet sein sollte, nahe 0 mm liegen.

Neben der Differenzierung zwischen *potenzieller* und *aktueller* Verdunstung wird in der Fachliteratur zwischen *Evaporation* und *Transpiration* unterschieden, wobei die *Transpiration* jenen Wassertransport bezeichnet, der sich aus den Spaltöffnungen der Blätter (den sog. Blattstomata) in die Atmosphäre vollzieht, während die *Evaporation* lediglich nicht-stomatäre Transporte umfasst, wie z.B. die Verdunstung des Wassers unmittelbar aus dem Boden heraus, oder die Verdunstung eines Wasserkörpers, etwa eines Sees oder eines Regentropfens auf einem Blatt. In der Regel handelt es sich jedoch um einen kombinierten Prozess, der den gesamten Bestand einbezieht. Dieser Gesamtprozess wird als *Evapotranspiration* bezeichnet. Bei nahezu geschlossenen Beständen gilt:  $Evaporation < Transpiration < Evapotranspiration < potenzielle Verdunstung$  („<“ bedeutet „kleiner als“).

Der Oberbegriff *Verdunstung* beschreibt allgemein die Phasenänderung des Wassers von der Flüssig- zur Dampfphase.

Verdunstungsprozesse verbrauchen Energie und führen, sofern gute Bodenfeuchte- und Transpirationsbedingungen vorliegen, zu einer Abkühlung des Blattapparats unter die Temperatur der umgebenden Luft. Während der Wasserdampfabgabe sind die für den gasförmigen Stoffaustausch zuständigen Spaltöffnungen der Blätter weit geöffnet.

Bei Bodentrockenheit dagegen schließt die Pflanze ihre Blattstomata, um sich vor Wasserverlust zu schützen. Da in diesem Fall die von der Sonne eingestrahelte Energie nur noch zu einem geringen Teil für Transpirationszwecke genutzt wird, führt der restliche Energieanteil zu einer Erhöhung der Blatttemperatur, die über die Lufttemperatur hinaus steigen kann. Insofern ist die mittägliche Differenz zwischen Blatt- und Lufttemperatur ein Indikator für den Bodenwassergehalt (Jackson et al., 1981). Vor allem in südeuropäischen Regionen mit geringer Wolkenbedeckung bieten sich deshalb satellitengetragene Radiometer zur Messung der Landoberflächentemperatur und zur großflächigen Abschätzung der Evapotranspiration an (siehe Kalma et al., 2008).

Schlagbezogene Verdunstungsmessungen erfolgen in Deutschland überwiegend mittels sog. Gasanalyser (modernes schnell abtastendes Messprinzip) und mittels Lysimeter



Abb. 3.3.2 (oben): Turbulenzgeräte zur Messung des Wärme- und Wasserdampfstroms in der bodennahen Luftschicht. Der Gasanalyser ist rechts am Mast montiert. Unten: Ebenerdige Lysimeterfläche im Vordergrund und Einstiegsschacht in die unterirdische Lysimeterkammer im Hintergrund (Fotos: C.Frühauf/DWD-ZAMF).

(traditionelles bodenphysikalisches Messprinzip). Gasanalyser erfassen den turbulenten Wasserdampfstrom in der bodennahen Luftschicht oberhalb des Bestandes und verlangen eine Mindestgröße der Messfläche, um die Messsignale plausibel interpretieren zu können (Abb. 3.3.2). Bei Lysimetern handelt es sich um ebenerdig in den Boden eingelassene, oben offene quader- oder zylinderförmige Behälter, die mit dem umgebungsgleichen Boden befüllt und der umgebungsgleichen Kultur bepflanzt sind (Aboukhaled et al., 1982) (Abb. 3.3.2). Zur Vermeidung von Staunässe am Behälterboden wird mittels sog. Saugkerzen ein Unterdruck erzeugt, der die Saugspannung eines ungestörten Bodens imitiert.

Die Verdunstung lässt sich durch eine kontinuierliche Wägung der Behälter in der unterirdischen Lysimeterkammer bestimmen, wobei neben der Gewichtsänderung des Bodenvolumens auch der zeitgleich zu messende Niederschlagseintrag und die Sickerwassermenge zu berücksichtigen sind. Die Genauigkeit der Verdunstungsmessung sollte daher jener der Niederschlagsmessung entsprechen, d.h.  $\pm 0.1$  Liter pro Quadratmeter, was einer Wasserhöhe von  $\pm 0.1$  mm bzw. einer flächenbezogenen Wassermasse von  $\pm 100$  g/m<sup>2</sup> entspricht. Dieser Wert – in Relation gesehen zum mittleren Trockengewicht eines ca. 1500 kg schweren Bodenwürfels mit einer lysimetertypischen Kantenlänge von 1 m – zeigt den hohen Genauigkeitsanspruch, der an die Wägung zu richten ist.

### 3.4 Tau

Nächtliche Taubildung spielt in unseren geografischen Breiten meteorologisch eine untergeordnete Rolle. In Norddeutschland erreichen monatliche Taumengen im Juni ca. 2 %, im Oktober 8 % der mittleren monatlichen Niederschlagssumme. Gleichwohl kann der Taubenetzung eine hohe landwirtschaftliche Bedeutung zukommen, weshalb

dieser Thematik Aufmerksamkeit gewidmet werden sollte. Neben ihrem phytopathologischen Einfluss auf das pilzliche Infektionsgeschehen (siehe Kapitel 6.7, 6.8) wirkt die Taubenetzung transpirationsbedingten Wasserverlusts der Pflanzen entgegen, was vor allem in ariden Klimaregionen von Bedeutung ist (Kidron et al., 2000). Zudem kann Tau wachstumsfördernd wirken (Kerr und Beardsell, 1975).

Experimentelle Nachweise von nächtlichen Taumengen erfolgten in verschiedenen Regionen der Erde (Wallin, 1967). Sie zeigen, dass die maximal gemessene nächtliche Taumenge bei ca. 0.6 mm liegt. Theoretische Abschätzungen unter idealisierten Bedingungen ergeben etwas höhere Mengen von bis zu 0.8 mm pro Nacht. Begünstigend wirken lange wolkenlose Strahlungsnächte und hohe relative Luftfeuchten, so dass der Jahresgang des Taufalls im zeitigen Frühjahr und späten Herbst einen höheren Wert aufweist als im Sommer. Häufig liegt der nächtliche Tau, so er denn auftritt (Wind und Bewölkung wirken dem Prozess entgegen oder schließen ihn aus!), im Bereich der Nachweisgrenze des Niederschlags (0.1 mm).

Sporadische Messungen am ZAMF (Zentrum für Agrarmeteorologische Forschung, Braunschweig) mittels eines elektronischen Minilysimeters, welches eine künstliche Grasdecke als Taukollektor besaß, zeigten maximale Taumengen von 0.25 mm (Abb. 3.4). Der Beginn der Taubildung richtet sich nach der einsetzenden abendlichen Dämmerungsphase und somit nach dem Zeitpunkt, ab dem die thermische Ausstrahlung des Erdbodens über die abklingende Sonneneinstrahlung zu dominieren beginnt.

Voraussetzung für die Taubildung ist neben der deutlichen Abkühlung der bodennahen Luftschicht ein Anstieg der relativen Luftfeuchte sowie eine strahlungsbedingte starke Abkühlung der obersten Vegetationsschicht.

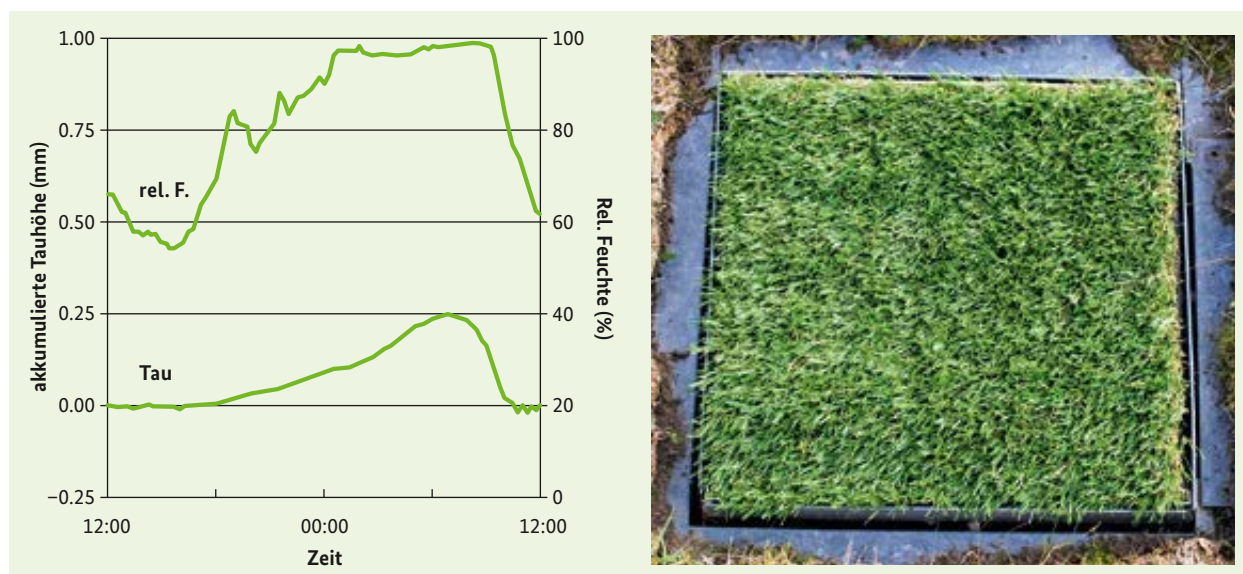


Abb. 3.4: Zeitlicher Gang der akkumulierten Tauhöhe (linke Grafik, unten), gemessen mit einem kunststoffrasenbedecktem Minilysimeter (rechts) während des Zeitraums 3.-4. Oktober 2014 in Braunschweig. Die links oben eingezeichnete Kurve gibt die in 20 cm Höhe über Gras gemessene relative Luftfeuchte an (Foto: M.Meyer/ZAMF).

Zudem werden infolge der thermischen Stabilisierung der Luftschicht turbulente Windschwankungen gedämpft, so dass die Windbewegung abklingt. Als Folge all dieser Prozesse kann Kondensation bzw. Taubildung auf einer unterkühlten natürlichen oder künstlichen Fläche auftreten. Spätestens die morgendliche solare Einstrahlung sorgt in Verbindung mit steigender Lufttemperatur und sinkender Luftfeuchte dafür, dass der Verdunstungsprozess angeregt und die Taubildung beendet wird.

Die nachts sich ansammelnde Taumenge hängt allerdings nicht nur von den meteorologischen Randbedingungen ab, sondern auch vom Pflanzentyp und dessen Blattfläche. Mithilfe von Lysimetern konnten z.B. Xiao et al. (2009) in Norddeutschland nachweisen, dass Gras mehr Tau sammelt als Gerste und Mais. Monatliche Taumengen lagen zwischen 0.3 und 5.7 mm mit einem nächtlichen Mittelwert von 0.17 mm und einem nächtlichen Höchstwert von 0.6 mm. Insgesamt erreichte der nächtliche Taufall Werte zwischen 5.5 % (Wintergerste/Brache) und 6.9 % (Gras) des Jahresniederschlags.

### 3.5 Blattbenetzung

Die Blattbenetzung ist nicht nur von mikrometeorologischem, sondern auch von phytopathologischem Interesse. So wird z.B. die Intensität pilzlicher Epidemien vor allem von der Blattbenetzungsdauer gesteuert. Der Grund hierfür ist, dass luftgetragene Pilzsporen, sobald sie auf die Blattoberfläche treffen, einige Zeit benötigen, um in das Blattgewebe zu gelangen. Während dieser Zeit müssen sie vor dem Vertrocknen geschützt bleiben, was ein ausreichend langes Benetzungsereignis voraussetzt.

Die Dauer der Blattbenetzung hängt von verschiedenen meteorologischen Faktoren ab, wie z.B. der zeitlichen Niederschlagsverteilung, von Tau- und Verdunstungsphasen und damit von den Strahlungsverhältnissen, der Windgeschwindigkeit, sowie der Temperatur und Luftfeuchte. Eine Daumenregel besagt, dass Benetzungszeiten grob mit Zeiträumen zusammenfallen, in denen die relative Feuchte mindestens 90 % beträgt (Häckel, 1984). Darüber hinaus spielen Blattgeometrie und -morphologie eine Rolle.

Ein Dilemma der Blattbenetzungsmessung besteht in der fehlenden Standardisierung. Unterschiedliche Sensortypen zeigen unterschiedliches Antwortverhalten auf einsetzende oder abklingende Benetzungsereignisse und reagieren zum Teil nicht nur auf Flüssigwasser, sondern auch auf Luftfeuchtigkeit. Der Grund für die uneinheitlichen Reaktionen ist vor allem in den unterschiedlichen Bautypen der Sensoren zu suchen.

So gibt es elektrische Drahtharfen, in die Blätter eingespannt werden. Vorhandenes Wasser an den Kontaktstellen zwischen Blatt und Draht führt zu einem veränderten Spannungssignal, welches jenseits einer subjektiv festgelegten

Signalschwelle als ‚Benetzung‘ zu interpretieren ist. Der Vorteil der unmittelbaren Messung an der Pflanze kann durch das Eigengewicht der Harfe zunichte gemacht werden, denn stärkere Windbewegung kann zum Abriss des eingespannten Blattes führen, weshalb die Messung häufig kontrolliert werden muss.

Ferner gibt es Messverfahren, bei denen das Blatt durch einen Papierfilz imitiert wird, wobei Elektroden dessen

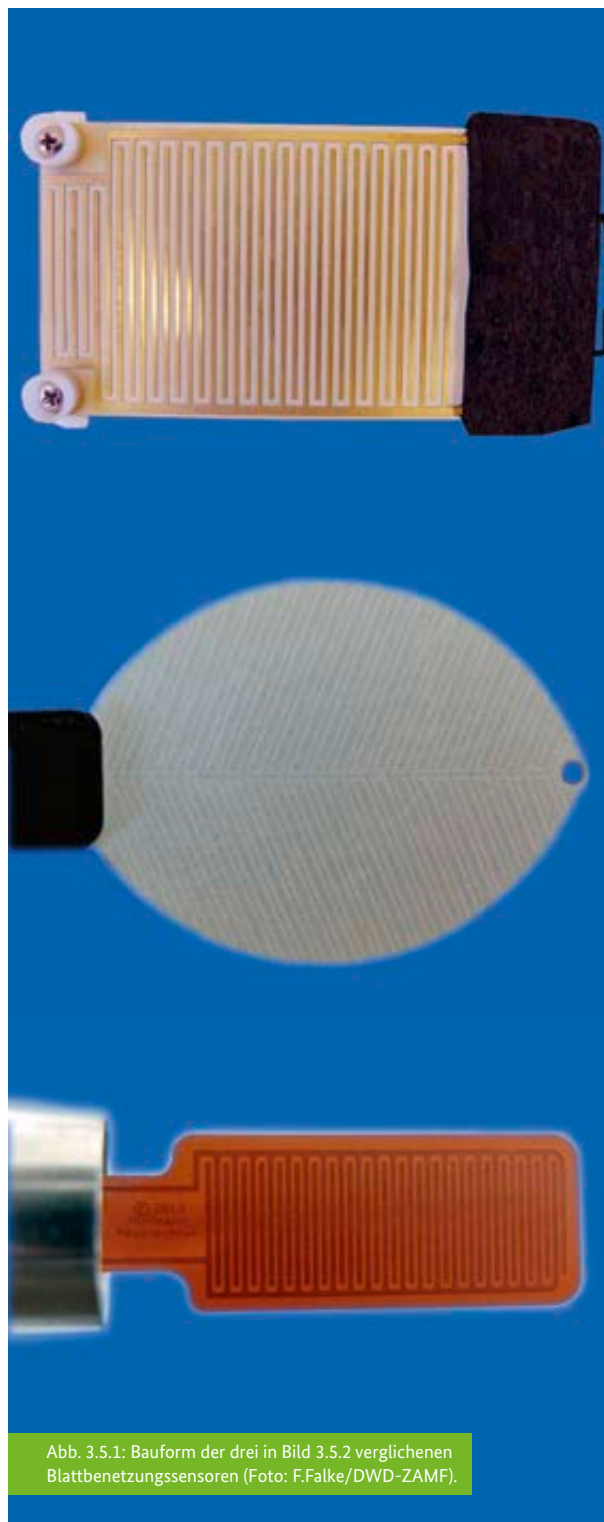
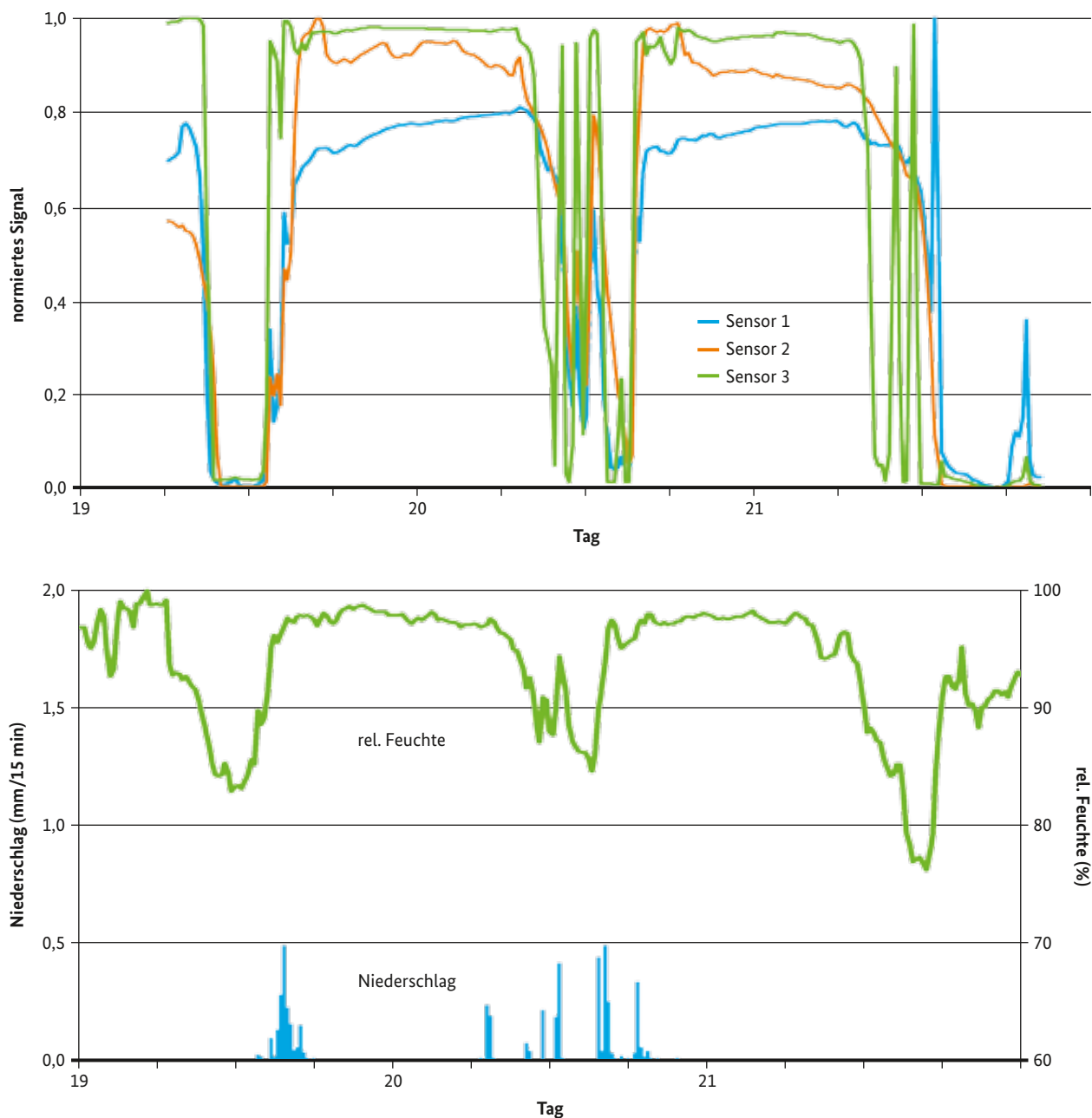


Abb. 3.5.1: Bauform der drei in Bild 3.5.2 verglichenen Blattbenetzungssensoren (Foto: F.Falke/DWD-ZAMF).

Abb. 3.5.2: Viertelstündige Messung der Benetzung mit drei verschiedenen Benetzungssensoren, installiert in 1 m Höhe über Gras (Braunschweig, 19.-21.9.2015). Zur Erleichterung der Interpretation sind Niederschlag und relative Luftfeuchte ebenfalls dargestellt.



Feuchtigkeitsverlauf ermitteln. Papierfilze haben den Nachteil, dass Tropfen absorbiert werden und dabei ihre typische Form verlieren.

Schließlich gibt es mit Leiterbahnen versehene Kunststoffplatten, die z.B. kapazitiv die Benetzung erfassen (Abb. 3.5.1). Um eine nahezu überwachungsfreie Messung zu gewährleisten, scheint dieser Bautyp noch am geeignetsten, zumal Taufilm und Tropfen in ihrer typischen Form auf der Sensorfläche verbleiben. Dennoch weisen auch derartige Sensoren unterschiedliche Anfeuchtungs- und Abtrocknungsreaktionen auf (Abb. 3.5.2).

Ein weiterer Nachteil der Benetzungsmessung ist die Vielfalt von Installationsmöglichkeiten. Auch wenn eine ältere – heute nicht mehr gebräuchliche – VDI-Richtlinie (VDI = Verein Deutscher Ingenieure) empfahl, den Sensor in 1.0 m Höhe zu montieren, ihn nach Norden auszurichten und um bis zu 45° zu neigen, wurde ihr wegen der unterschiedlichsten Praxisanforderungen nur selten gefolgt.

Der DWD hat sich u.a. auch aus diesem Grund dafür entschieden, die Benetzungsdauer bestandstypisch zu modellieren (siehe z.B. Hoppmann und Wittich, 1997), was die Möglichkeit einer Benetzungsprognose auf Basis der numerischen Wettervorhersage eröffnet.



## Literatur

Aboukhaled, A., Alfaro, A., Smith, M., 1982. Lysimeters. FAO Irrigation and Drainage Paper, 39.

Campbell, G.S., 1985. Soil physics with BASIC. Elsevier, Amsterdam.

Friesland, H., Löpmeier, F.-J., 2007. The performance of the model AMBAV for evapotranspiration and soil moisture on Müncheberg data. In: K.C. Kersebaum, J.-M. Hecker, W. Mirschel, M. Wegehenkel (Eds.) Modelling Water and Nutrient Dynamics in Soil-Crop Systems. Springer, Dordrecht, 19-26.

Gömann, H., et al., 2015. Agrarrelevante Extremwetterlagen und Möglichkeiten von Risikomanagementsystemen. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), Thünen Report 30, Johann Heinrich von Thünen Institut, Braunschweig.

Häckel, H., 1984. Zur Messung der Benetzungsdauer von Pflanzen: Verfahren und Ergebnisse. Meteorolog. Rdsch. 37, 97-104.

Hoppmann, D., Wittich, K.-P., 1997. Epidemiology-related modelling of the leaf-wetness duration as an alternative to measurements, taking *Plasmopara viticola* as an example. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, 104, 533-544.

Jackson, R.D., Idso, S.B., Reginato, R.J., Pinter, P.J., 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator. Water Resources Research, 17, 1133-1138.

Kalma, J.D., McVicar, T.R., McCabe, M.F., 2008. Estimating land surface evaporation: A review of methods using remotely sensed surface temperature data. Surv. Geophys., 29, 421-469.

Kerr, J.P., Beardsell, M.F., 1975. Effect of dew on leaf water potentials and crop resistances in a Paspalum pasture. Agron. J., 67, 596-599.

Kidron, G.J., Yair, A., Danin, A., 2000. Dew variability within a small arid drainage basin in the Negev Highlands, Israel. Q. J. R. Meteorol. Soc., 126, 63-80.

Michel, R., Günther, R., 2014. Berechnungs- und Messverfahren zur Bewässerungssteuerung. In: R. Michel, H. Sourell (Hrsg.): Bewässerung in der Landwirtschaft. Agrimedia, 95-109.

Renger, M., Strebel, O., 1980. Berechnungsbedarf landwirtschaftlicher Kulturen in Abhängigkeit vom Boden. Wasser und Boden, 32 (12), 572-575.

Schrödter, H., 1985. Verdunstung - Anwendungsorientierte Messverfahren und Bestimmungsmethoden. Springer-Verlag, Berlin.

Wallin, J.R., 1967. Agrometeorological aspects of dew. Agr. Meteorol. 4, 85-102.

Xiao, H., Meissner, R., Seeger, J., Rupp, H., Borg, H., 2009. Effect of vegetation type and growth stage on dewfall, determined with high precision weighing lysimeters at a site in northern Germany. J. Hydrol. 377, 43-49.



## 4 Grundlegende agrarmeteorologische Modelle

*Autoren: Christian Kersebaum, Wolfgang Janssen, Torben Meinert, Cathleen Frühauf*

Die Mehrzahl der in agrarmeteorologischen Verfahren gewonnenen Erkenntnisse und Größen beruhen auf Modellrechnungen. Hierzu sind Spezialmodelle entwickelt worden, die an dieser Stelle ausführlich erläutert werden sollen, damit Mehrfachbeschreibungen in den einzelnen Kapiteln vermieden werden. Die Zusammenstellung dient dazu, einen Überblick über die Vorgehensweise bei der agrarmeteorologischen Modellierung zu vermitteln und das Verständnis

für die verwendeten Methoden und gemachten Annahmen zu erzeugen. Hierbei soll nicht auf die durchaus komplexen Gleichungsansätze eingegangen, sondern eher beschreibend erklärt werden, wie die Modelle arbeiten und wozu die Ergebnisse genutzt werden können. Weiterführende Informationen sind den angegebenen Literaturangaben zu entnehmen.

## 4.1 Wachstumsmodelle

Die Agrarmeteorologie beschäftigt sich mit dem Einfluss des Wetters, der Witterung und des Klimas auf Pflanzenbestände. Je nach Entwicklungsstand der Pflanzen unterscheiden sich die Wechselwirkungen mit dem Boden und der Atmosphäre. So ist das Transpirationsvermögen einer gerade aufgelaufenen Pflanze sehr viel geringer als das einer voll ausgewachsenen Pflanze. Ebenfalls lässt sich aus der Pflanzenentwicklung auch der Düngebedarf ableiten, denn was intensiv wächst, benötigt auch entsprechend viele Nährstoffe. Somit ist die Kenntnis über den momentanen Pflanzenentwicklungsstand eine Voraussetzung, um gezielte Empfehlungen für den Landwirt auszusprechen.

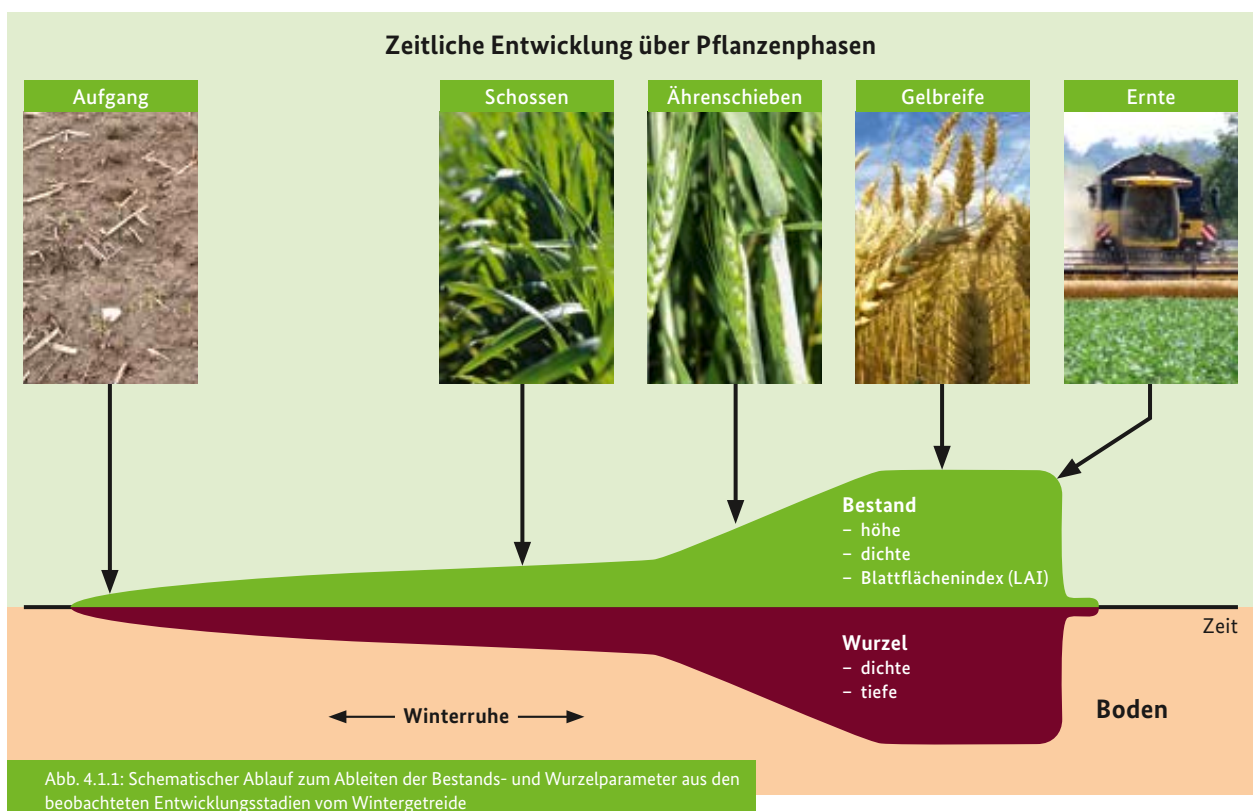
### 4.1.1 Phänologische Beobachtungen

Der DWD unterhält zwei Beobachtungsnetze für die bundesweite Bestimmung der Pflanzenentwicklung, das sogenannte phänologische Netz der Sofortmelder und das der Jahresmelder. Die ca. 1200 ehrenamtlichen Beobachter der Jahresmelder sammeln ihre maximal 180 phänologischen Beobachtungen im Laufe des Jahres und schicken ihren Meldebogen per Post am Ende des Jahres dem DWD zu, wo er dann weiterverarbeitet wird. Das Netz besteht seit 1951 und es lassen sich zum einen die starke Variabilität zwischen den einzelnen Jahren und zum anderen aber auch der Einfluss des Klimawandels in den Terminen der Beobachtungen (z.B. Blühbeginn der Forsythie, Fruchtreife des Apfels) über

den vorliegenden Zeitraum feststellen. Das Beobachternetz der Sofortmelder umfasst etwa 400 ehrenamtliche Beobachter. Dokumentiert werden lediglich 80 Pflanzenphasen von wild-wachsenden Pflanzen und wichtigen Kulturpflanzen. Die Daten werden dem DWD unmittelbar online übermittelt, damit aktuelle Pflanzeninformationen für die Modelle zur Verfügung stehen. Bei den Kulturpflanzen werden in der Regel mehrere den Wachstumsverlauf repräsentierende Entwicklungsstadien beobachtet. Aus ihnen kann der Verlauf spezifische Größen abgeleitet werden, die den Pflanzenbestand beschreiben. In nachfolgender Abbildung 4.1.1 ist schematisch das Vorgehen idealisiert dargestellt, wobei jede zu beschreibende Größe in Wirklichkeit einen ganz individuellen Verlauf hat.

Zu den wichtigsten Kulturarten ist der zeitliche Verlauf der durchschnittlichen Bestandshöhe und -dichte sowie des Blattflächenindex in Abhängigkeit der phänologischen Phasen bekannt, so dass der Verlauf in der Regel über fünf Entwicklungsphasen hinreichend genau beschrieben werden kann. Ergänzend sind auch die Wurzeltiefe und deren Dichteverteilung mit der Tiefe von Interesse, da diese für die Wasserversorgung der Pflanze und somit für das Transpirationsvermögen der Pflanze entscheidend sind. Die fünf Pflanzenphasen stehen für

- » den Beginn des Wachstums bzw. der Berechnung
- » den Zeitpunkt mit beginnendem Wasserverbrauch
- » den Zeitpunkt mit dem höchsten Wasserverbrauch
- » den Zeitpunkt mit reduziertem Wasserverbrauch
- » den Zeitpunkt des Endes des Wasserverbrauchs.



**Tab. 4.1.1: Übersicht über die charakterisierenden Pflanzenphasen verschiedener Kulturpflanzen. Die Tageskorrekturen (+ oder - Anzahl Tage) sind in Klammern angegeben.**

Kultur	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Phase 5
Winterweizen	Aufgang	Schossen (-5)	Blüte (-5)	Gelbreife	Ernte
Sommerweizen	Aufgang	Schossen (-5)	Ährenschieben (+5)	Gelbreife	Ernte
Wintergerste	Aufgang	Schossen (-10)	Blüte	Gelbreife	Ernte
Sommergerste	Aufgang	Schossen (-5)	Ährenschieben (-5)	Gelbreife	Ernte
Mais	Aufgang	Fahnschieben(-35)	Blüte	Siloreife (-14)	Ernte
Zuckerrüben	Aufgang	Bestand geschlossen (-20)	Bestand geschlossen (+10)	Ernte (-14)	Ernte
Kartoffeln	Aufgang	Reihen geschlossen (-5)	Bestand geschlossen (-3)	Beginn Absterben (+16)	Ernte
Roggen	Aufgang	Schossen	Ährenschieben (+5)	Gelbreife	Ernte
Nadelwald	1.1.	Maitrieb	Maitrieb (+14)	Winterruhe	31.12.
Laubbaum	1.1.	Blattentfaltung	Blattentfaltung (+14)	Laubverfärbung	Laubfall
Obst	1.1.	Blüte	Blüte (+14)	Laubverfärbung	Laubfall
Raps	Aufgang	Schossen	Beginn Blüte	Ende Blüte (+12)	Ernte

Für die wichtigsten Kulturen sind die entsprechenden Pflanzenphasen für die 5 verschiedenen Zeitpunkte in Tabelle 4.1.1 aufgelistet.

Diese Art der Steuerung des aktuellen Pflanzenwachstums in agrarmeteorologischen Modellen ist von einer zeitnahen Meldung der Beobachter abhängig. Für zurückliegende Jahre kann zusätzlich auf das an Beobachtern und Phasen zahlreichere phänologische Netz der Jahresmelder zugegriffen werden.

Durch normierte Wachstumsverläufe werden spezielle untypische Bedingungen nicht genau erfasst. So werden in der Regel die Unterschiede in den verschiedenen Sorten oder der Einfluss des Bodens auf die Wurzelentwicklung nicht hinreichend genau berücksichtigt. Bei jeder Kultur wird immer von einer Standardverteilung der Wurzeln ausgegangen, die in der Praxis von der Realität abweichen kann und die natürliche Bandbreite etwas einschränkt. Das Wasserangebot im Boden steuert maßgeblich die Wurzelverteilung im Boden. In feuchten Jahren befindet sich genügend Wasser in den oberen Bodenschichten, so dass die Wurzeln nicht so stark in die Tiefe wachsen wie in trockenen Jahren.

Ein besonderer Aspekt bei der Nutzung phänologischer Daten ist, dass diese Beobachtungen nicht flächendeckend vorliegen. Es ergibt sich somit die Notwendigkeit, die punktuellen Beobachtungen auf die Fläche zu übertragen. Dieses kann mitunter ein schwieriges Unterfangen sein, da die Beobachtungen naturgemäß auf kleinstem Raum stark schwanken können. Diese natürliche Schwankungsbreite wird durch unterschiedliche Temperaturangebote verursacht.

Eine zusätzliche Variabilität ist der Tatsache geschuldet, dass Beobachtungen keine exakten Messungen sind und immer von dem persönlichen subjektivem Empfinden des Beobachters abhängen. Abbildung 4.1.2 zeigt zwei flächende-

ckende Interpolationen aus den punktuellen phänologischen Beobachtungen. In der linken Grafik werden alle Beobachtungstermine der Apfelblüte 2016 bei der Interpolation genau getroffen und in der rechten Grafik über eine glättende Interpolation sinnvoll interpretiert. Der Vergleich zeigt deutlich, welche glättende Wirkung eine Interpolation haben kann.

Obwohl die Apfelblüte eine vergleichsweise geringe Bandbreite bei den Beobachtungen aufweist, sind in der linken Grafik von Abbildung 4.1.2 einige punktuelle Gebiete auszumachen, die irgendwie nicht zum Umfeld passen. In der rechten Grafik werden hingegen alle Beobachtungen interpretiert und die aus der Reihe fallenden Termine ignoriert, so dass ein homogeneres Feld entsteht. Aus einem so abgeleiteten Feld lässt sich für jeden beliebigen Ort ein Eintrittstermin ableiten. Bei dieser Art der Interpolation sind die Werte für höher gelegene Gebiete von Gebirgen natürlich mit Vorsicht zu genießen, da dort irgendwann die Temperaturen so gering sind, dass der Anbau einer Kultur nicht mehr möglich ist.

Da phänologische Beobachtungstermine sehr stark mit dem zurückliegenden Temperaturverlauf korrelieren, überrascht es nicht, dass der Wachstumsverlauf bei vielen Pflanzen auch über Temperatursummen ausgedrückt werden kann.

#### 4.1.2 Temperatursummen

Die Länge der Entwicklungsphasen von Pflanzen steuert vor allem die Bildung vegetativer und generativer Organe, indem die durch die Photosynthese gebildeten Kohlenhydrate in unterschiedlicher Weise auf die einzelnen Pflanzenorgane verteilt werden (Abb. 4.1.3).

Ein großer Teil der wichtigsten Kulturarten, wie z.B. alle Getreidearten, steuert ihren Entwicklungsverlauf über die Akkumulation von Temperatursummen. Die Pflanzen reagieren

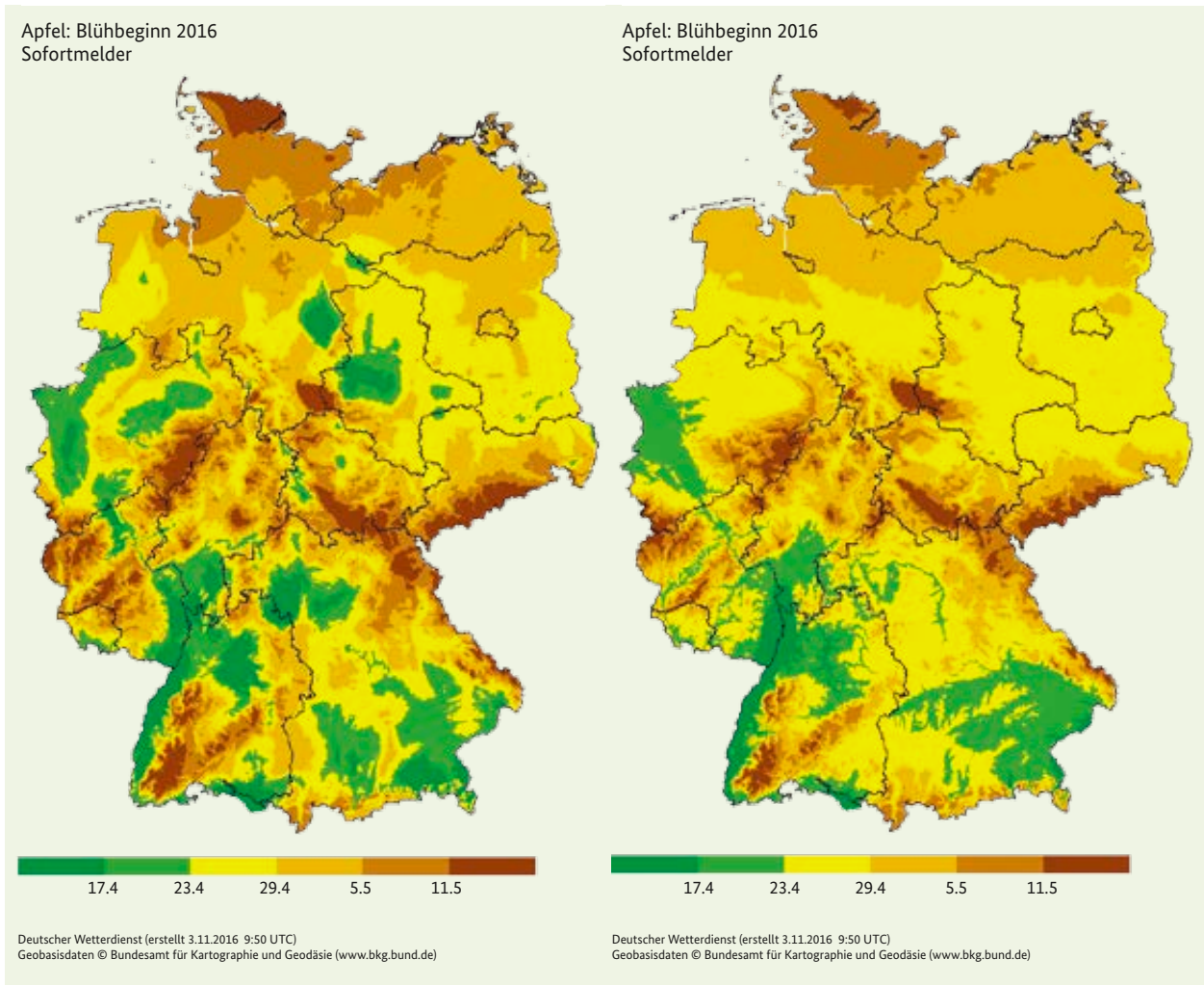
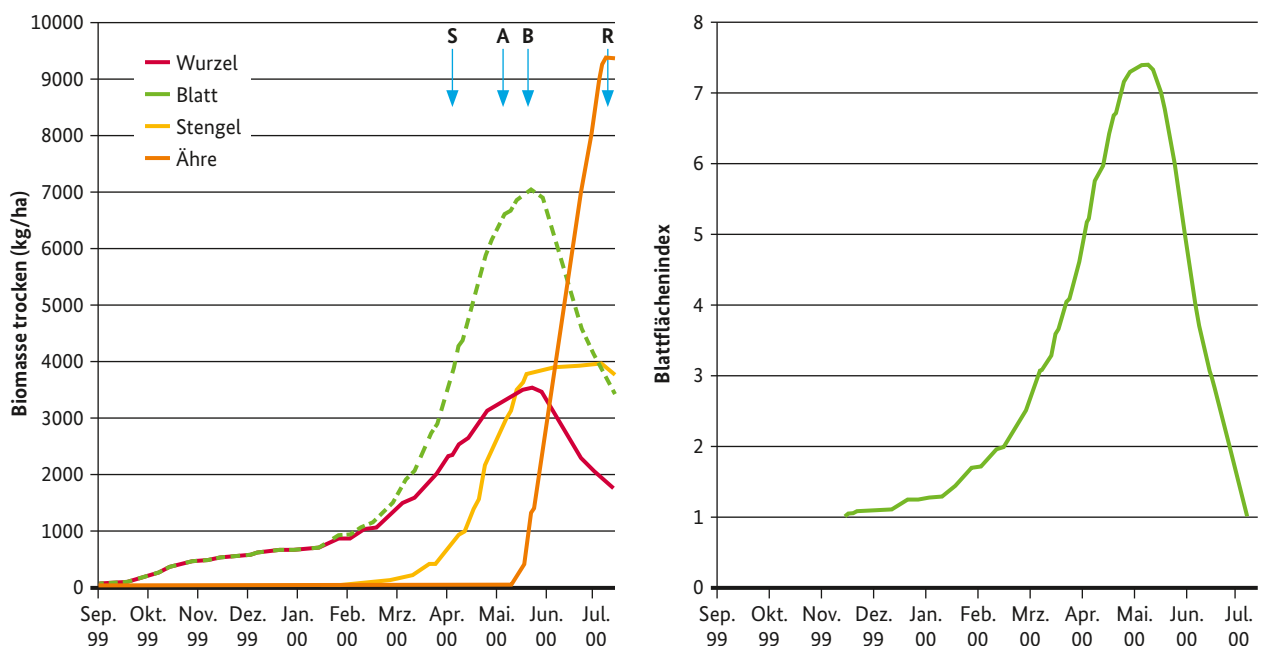
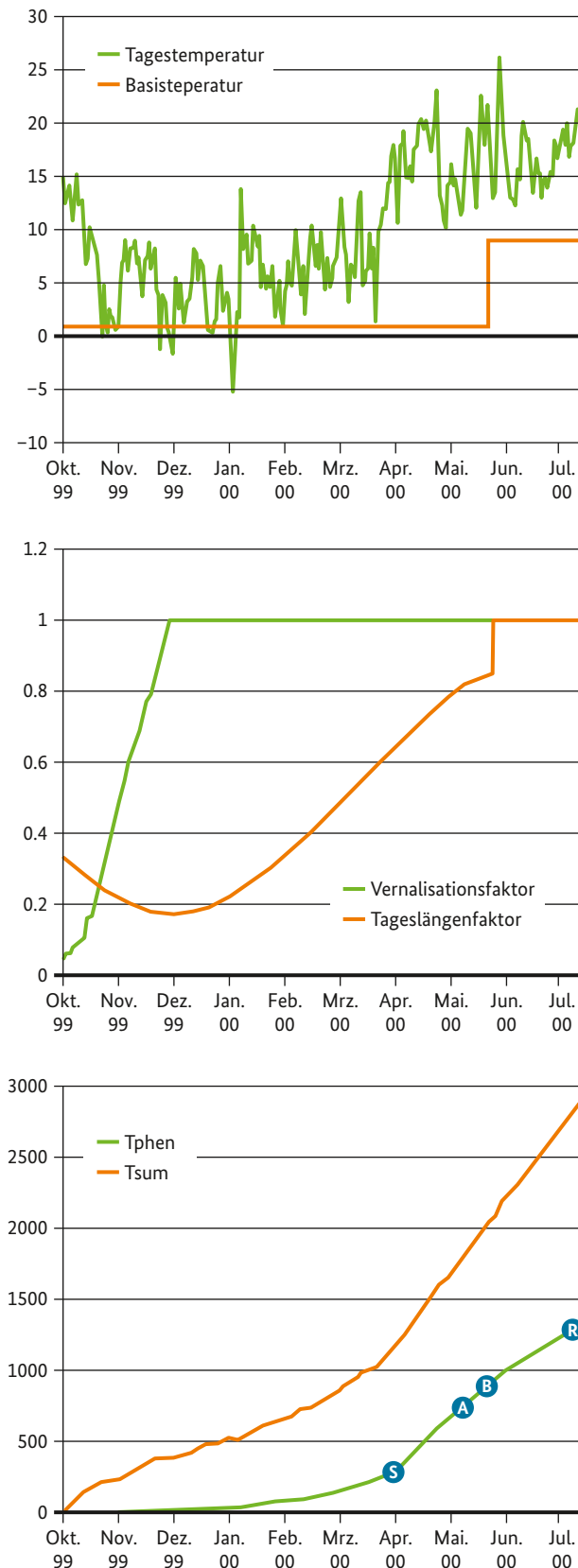


Abb. 4.1.2: Vergleich zweier interpolierter Karten

Abb. 4.1.3: Simulierte Verteilung der pflanzlichen Biomasse (Trockengewicht) auf verschiedene Organe von Winterweizen (links) in Abhängigkeit von der phänologischen Entwicklung (S = Schossen, A = Ährenschieben, B = Blüte, R = Gelbreife) und aus dem Blattgewicht berechneter Blattflächenindex (rechts).



**Abb. 4.1.4:** Reale Tagestemperatur (oben) mit Temperaturschwellen für die phänologische Entwicklung, Korrekturfaktoren der phänologisch effektiven Temperatursumme ( $T_{phen}$ ) für den Tageslängenanspruch und die Vernalisation (Mitte), und reale ( $T_{sum}$ ) und phänologisch effektive Temperatursumme ( $T_{phen}$ ) mit Entwicklungsstadien (unten).  
Erläuterung Stadien siehe Abb. 4.1.3.



daher auf eine erhöhte Temperatur mit einer Verkürzung ihrer Entwicklung bzw. einzelner Phasen.

Viele Pflanzen sind um den Zeitpunkt der Blüte besonders empfindlich gegenüber zu hohen oder zu niedrigen Temperaturen. Zur Vermeidung der dadurch entstehenden Schäden haben einige Arten bestimmte Sicherheits- und Kontrollmechanismen, wie z. B. die Tageslänge oder die Erfüllung einer bestimmten Kältesumme (Vernalisation), als weitere Steuerungsfaktoren entwickelt. Diese Faktoren beeinflussen das Erreichen der generativen Phase, in der die Samenanlagen, also in Falle des Getreides die Körner, angelegt werden.

Abbildung 4.1.4 zeigt am Beispiel von Winterweizen, wie sich die Tageslänge und die Erfüllung des Kältebedarfs auf die für die phänologische Entwicklung maßgebliche Temperatursumme  $T_{phen}$  auswirkt. Die Ansprüche an die Temperatursummen, Tageslänge und Vernalisation variieren jedoch zwischen einzelnen Sorten.

Zu hohe Wintertemperaturen können sich demnach bei Winterungskulturen mit einem höheren Vernalisationsbedarf verzögernd auf die Pflanzenentwicklung im Frühjahr auswirken, wenn nicht genügend Kältereize zur Erfüllung der Vernalisationsansprüche auftreten. Sind die Temperaturen im weiteren Verlauf ebenfalls erhöht, verkürzt sich die Phase der Kornfüllung, so dass möglicherweise geringere Erträge erzielt werden.

Für nicht-determinierte Arten (Arten bei denen die geerntete Frucht nicht aus einer Blüte hervorgeht, sondern ein Teil der vegetativen Biomasse ist), wie Grünlandarten (Gräser usw.), Zuckerrüben oder Kartoffeln, bedeuten höhere Temperaturen im Jahresverlauf in der Regel eine Ausdehnung ihrer Vegetationszeit.

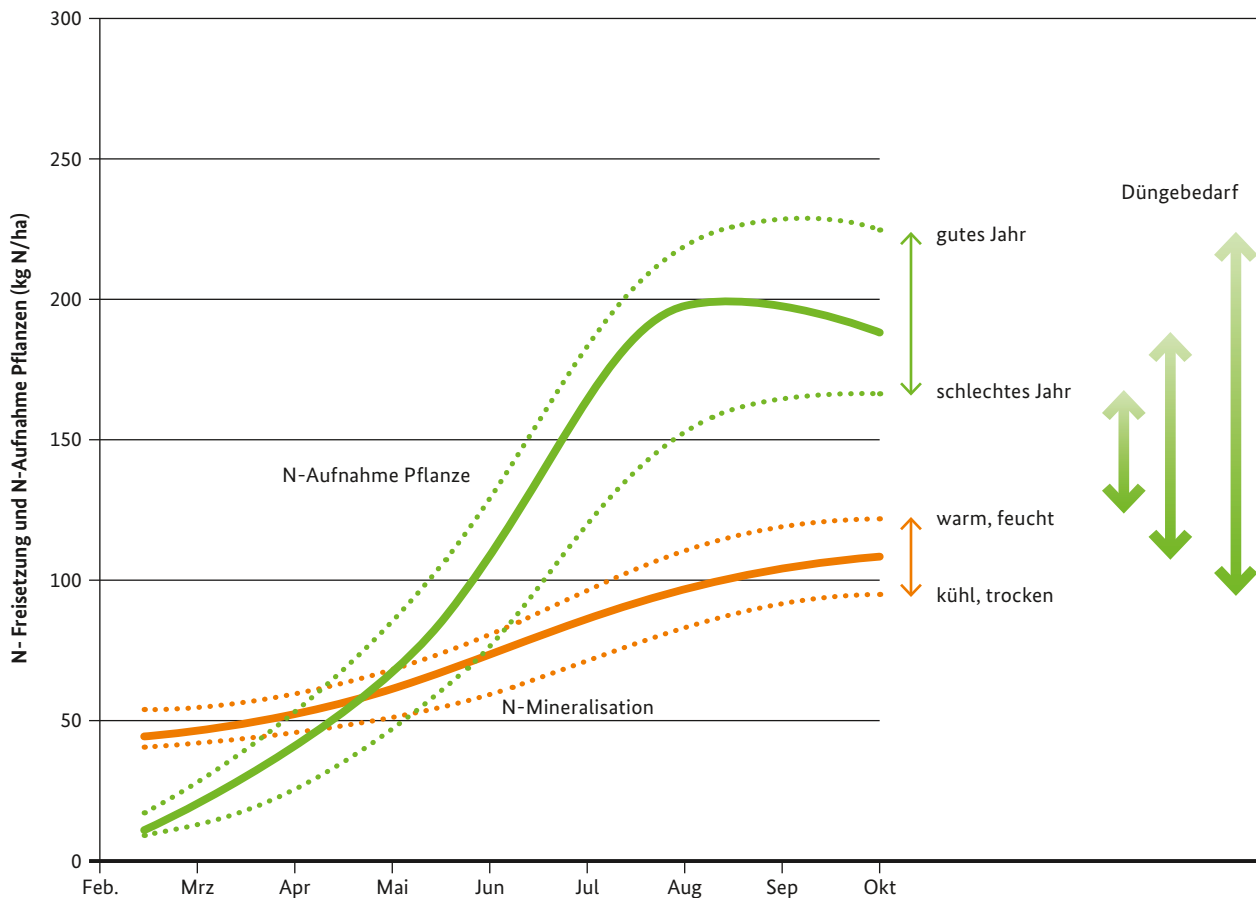
## 4.2 Stickstoffdynamik und Düngung

Die Stickstoffdüngung stellt eine besondere Herausforderung beim Management von Pflanzenbeständen dar. Dies liegt daran, dass die Stickstoffdynamik durch zahlreiche verschiedene Prozesse geprägt ist, die räumlich und zeitlich hoch variabel sind und in hohem Maße durch die Witterungsverhältnisse beeinflusst werden.

Die vom Jahreswitterungsverlauf abhängige N-Freisetzung aus organischer Substanz des Bodens sowie aus organischen Düngern und Rückständen der Vor- bzw. Zwischenfrucht und die unterschiedlichen Wachstumsbedingungen für die Pflanze führen zu Differenzen zwischen N-Angebot und N-Bedarf, die den Düngebedarf markieren (Abb. 4.2.1).

Hinzu kommen noch die nicht minder klimatisch bedingten möglichen Verluste durch N-Auswaschung und gasförmigen Verlusten durch Denitrifikation oder Ammoniakentgasung.

Abb. 4.2.1: Jahresschwankungen N-Bedarf und N-Angebot (schematisch) ohne Berücksichtigung der standort- und kulturspezifischen Obergrenzen



Neben der ökonomischen Effizienz der Düngung sind es vor allem die ökologischen Folgen einer nicht adäquaten Stickstoffdüngung, die die Landwirte dazu anhalten sollen, eine bedarfsgerechte Düngung durchzuführen. Um den Anforderungen der Düngeverordnung gerecht zu werden, muss die jährlich schwankende Relation von N-Bedarf, der sich aus dem Angebot im Boden und der maximal zulässigen Düngemenge ergibt, berücksichtigt werden. Dazu ist nicht nur eine zeitlich enge Erfassung der Bestandes- und Bodensituation notwendig, die über traditionelle Messverfahren kaum zu realisieren ist, sondern auch eine Abschätzung der N-Nachlieferung. Die Heranziehung von Modellen ist dafür sehr hilfreich.

Wasser-, Stickstoff- und Kohlenstoffdynamik im Boden stehen in engem Zusammenhang und in starker Wechselwirkung mit dem Pflanzenbewuchs. Somit sind auch hier Temperatur und Niederschlag die wesentlichen Faktoren, die die Prozesse der N-Dynamik bestimmen. Die überwiegend biologisch ablaufenden Prozesse der Kohlenstoff- und Stickstoffdynamik weisen eine deutliche Temperaturabhängigkeit auf: Die Umsatzgeschwindigkeit für die Mineralisation von Stickstoff aus dem Abbau der organischen Substanz sowie von Pflanzenrückständen und organischen Düngern steigt mit der Temperatur über einen weiten Bereich exponentiell an. Jedoch ist hierzu auch eine bestimmte Bodenfeuchte er-

forderlich. Sowohl bei sehr trockenem Boden als auch unter sehr feuchten Bedingungen wird die mikrobielle Aktivität gestört, so dass kaum eine Umsetzung von organischen Substanzen stattfindet.

Abbildung 4.2.2 zeigt beispielhaft die Funktion, mit der die Umsatzgeschwindigkeit im Modell HERMES täglich auf Basis der Temperatur und der simulierten Wassergehalte im Boden als Resultat von Niederschlag minus Verdunstung berechnet wird. Während diese Steuergrößen die Umsatzgeschwindigkeit beeinflussen, ist die absolute Höhe der täglichen Mineralisation von der Höhe des umsetzbaren Stickstoffpools abhängig. Dieser Teil der umsetzbaren Stickstoffverbindungen macht jedoch nur einen geringen Teil des insgesamt im Boden organisch gespeicherten Stickstoffs aus. Wie hoch dieser Anteil ist, hängt stark von der Vorgeschichte des Standorts, seiner Bewirtschaftung und den Klimaverhältnissen ab. Auch die Denitrifikation, die zu gasförmigen N-Verlusten bei geringen Sauerstoffgehalten im Boden führt, wird ebenfalls stark von der Temperatur beeinflusst. Sehr hohe Bodenfeuchte begünstigt die anaeroben Verhältnisse. Bei unvollständiger Anaerobie entsteht statt  $N_2$  das klimawirksame Spurengas  $N_2O$  (Lachgas), welches ein hohes Treibhauspotential aufgrund seiner langen Verweilzeit in der Atmosphäre hat.

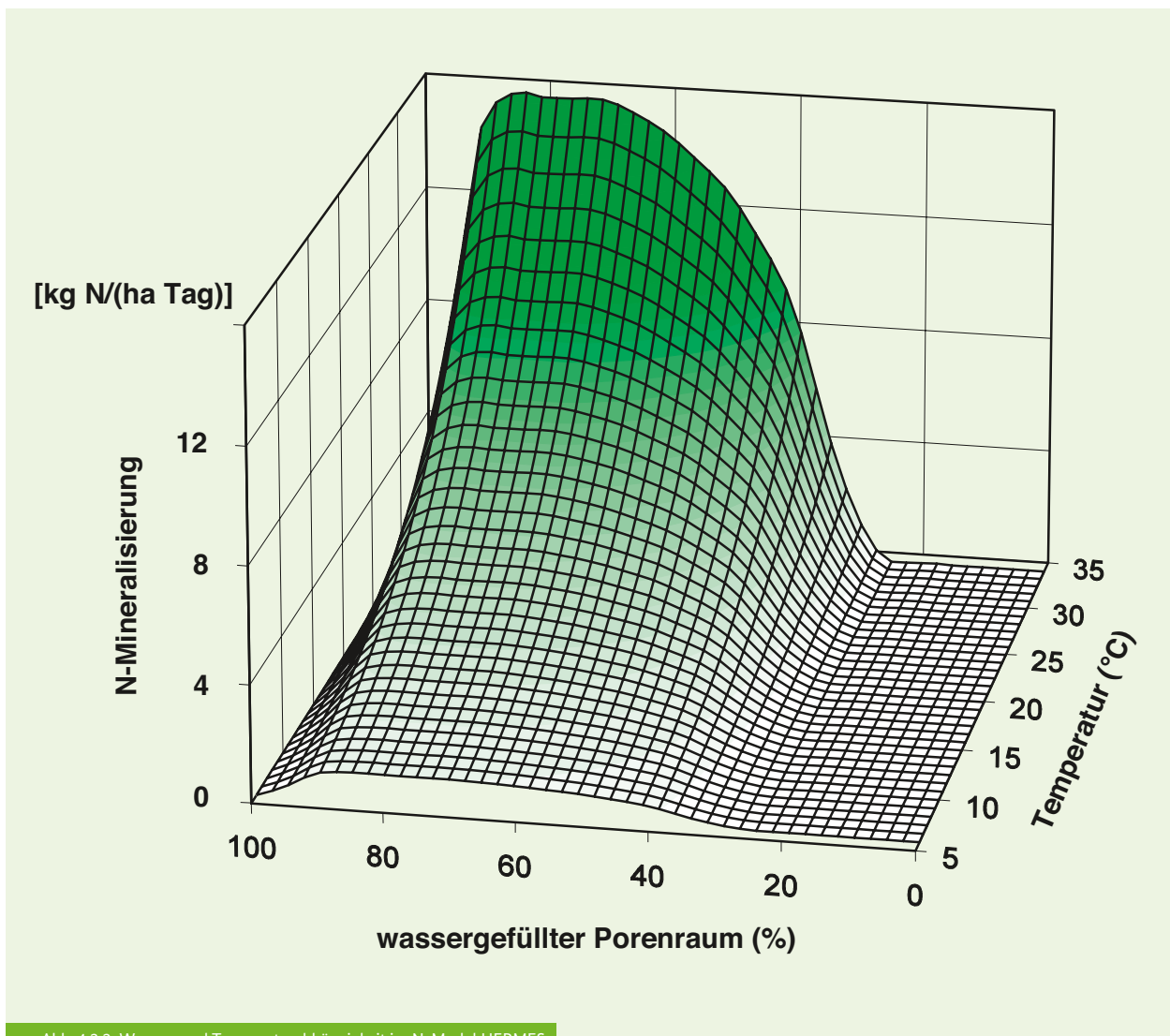


Abb. 4.2.2: Wasser- und Temperaturabhängigkeit im N-Model HERMES

Von Modellen zum Stickstoffhaushalt werden in der Regel neben der Ertragswirkung auch Aussagen in Bezug auf die damit verbundenen Emissionen erwartet. Die umfassende Dynamik der Stickstoffverbindungen wird in der Regel durch mehr oder weniger komplexe prozessorientierte Modelle beschrieben, die meist in täglicher Auflösung agrarmeteorologische Daten als Eingangsdaten verwenden. Die Eingangsgrößen entsprechen im Wesentlichen den im Kapitel Ertragsmodellierung genannten Eingaben (siehe Kapitel 4.3), da die Modellierung der Stickstoffdynamik die Einbeziehung der Pflanze als wesentliche Senke des mineralischen Bodenstickstoffgehalts berücksichtigen muss.

Der operationelle Einsatz in der Düngeberatung erfordert sowohl ein robustes Modell, welches in seinen Datenanforderungen nicht zu hoch sein darf, als auch einen schnellen Datenfluss mit möglichst aktuellen meteorologischen Daten. Prinzipiell gelten die im Abschnitt Ertragsmodellierung (siehe Kapitel 4.3) gemachten Aussagen.

Bei der Ermittlung des Düngebedarfs lässt sich einerseits eine Simulation der Stickstoffdynamik bis zum Zeitpunkt der Düngung mit aktuellen Wetterdaten durchführen und auf der Basis der sich nach Düngeverordnung ergebenden standort- und kulturbezogenen Obergrenzen eine Düngeempfehlung aus den simulierten Mineralstickstoffgehalt im Boden ableiten. Da jedoch die empfohlene Düngermenge den weiteren Bedarf bis zum nächsten Düngezeitpunkt bzw. auch bis zum Ende der Vegetationsperiode abdecken soll, ist andererseits eine prognostische Berechnung mit standortspezifischen Wetterszenarien vorteilhaft, die den künftigen Bedarf nach der Düngung berücksichtigt. Diese Prognose kann auf langjährigen Wetteraufzeichnungen und ggf. einer saisonalen Wetterprognose beruhen. Abbildung 4.2.3 zeigt ein Schema, welches im Modell HERMES dazu verwendet wird, den Stickstoffdüngerbedarf durch eine sequentielle, immer wieder mit aktualisierten Wetterdaten gefütterte Simulation für die einzelnen Wachstumsphasen abzuschätzen.



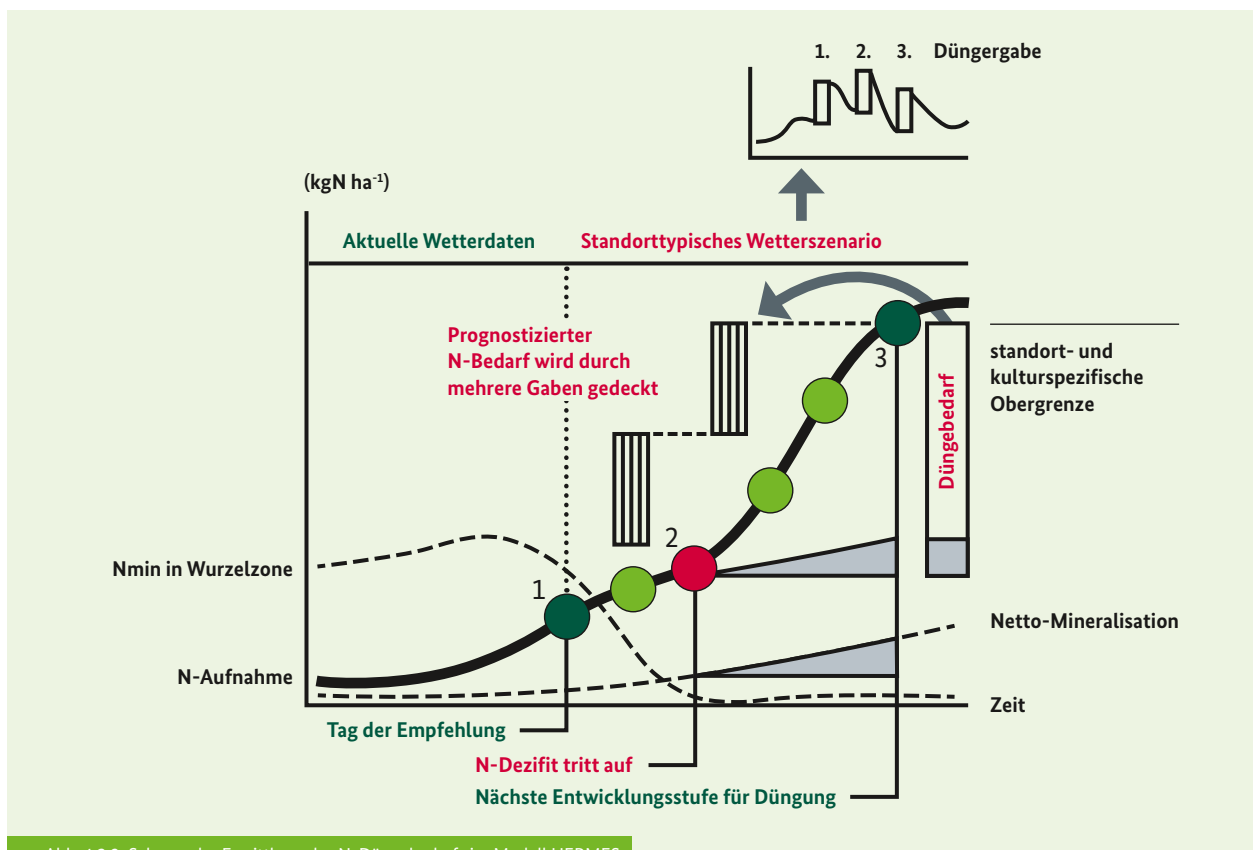


Abb. 4.2.3: Schema der Ermittlung des N-Düngebedarfs im Modell HERMES

### 4.3 Ertragsmodelle

Die Modellierung der Erträge landwirtschaftlicher Nutzpflanzen wurde bereits in den 1970er Jahren zunächst in den Niederlanden und in den USA begonnen. Ein Ziel dabei war, eine Möglichkeit zu haben, aus Wetterdaten und standörtlichen Informationen eine möglichst frühzeitige Prognose über die zu erwartenden Erntemengen für die Abschätzung der Getreidepreise auf den Weltmärkten zu erhalten.

Auch aus ökologischer Sicht sind Pflanzenwachstumsmodelle bzw. Ertragsmodelle von Bedeutung. Zum einen lassen sich durch langjährige Simulationen Ertragspotentiale für Standorte und die Ertragsvariabilität zwischen den Jahren abschätzen. Diese können für eine realistische Einschätzung des Düngebedarfs unter Berücksichtigung der nach Düngeverordnung zulässigen Obergrenzen herangezogen werden. Zum anderen erlaubt die Modellierung eine standortspezifische Analyse von Auswirkungen bestimmter Managementmaßnahmen auch auf schwer messbare Größen, wie z.B. die Nitratauswaschung. Diese Möglichkeit bekommt insbesondere unter dem Einfluss des sich ändernden Klimas eine Bedeutung: Die Landwirte können sich, unter den sich ändernden Bedingungen, nicht mehr auf ihre langjährigen Erfahrungen verlassen, um den neuen Herausforderungen zu begegnen. Die Modellierung kann hier Hilfestellung sowohl bei der Wahl der Sorten als auch des optimalen Auszeitpunkts leisten.

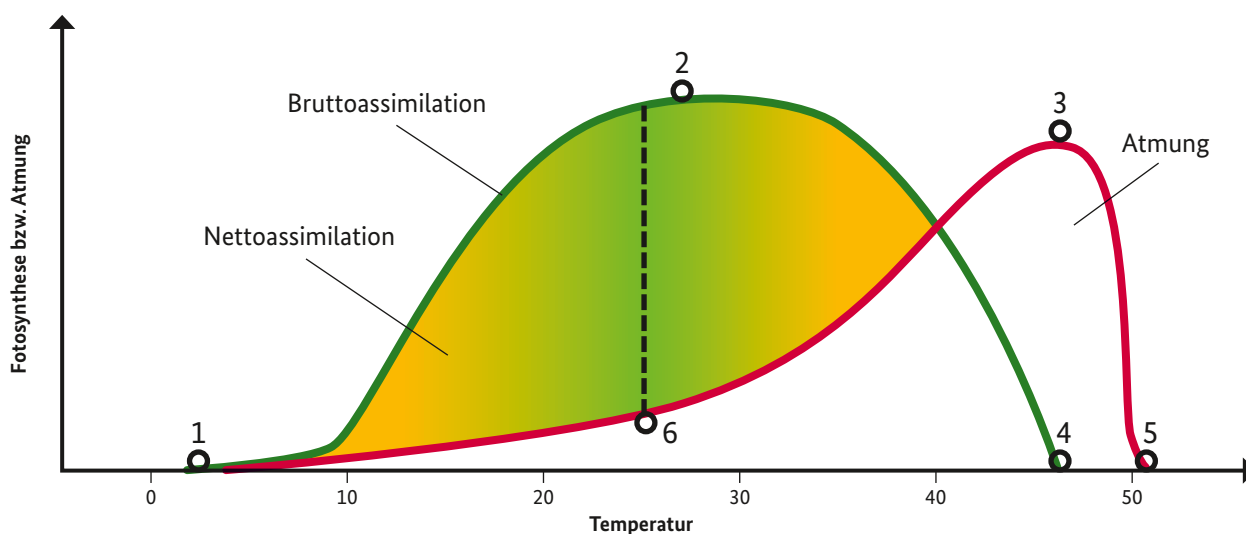
Obwohl Modelle immer nur eine Vereinfachung der Realität darstellen und nicht perfekt sind, stellen sie oft jedoch die einzige Möglichkeit dar, die sehr komplexen Zusammenhänge und Wechselwirkungen darzustellen und auf der Basis des jeweiligen Wissens mögliche Entwicklungen aufzuzeigen.

#### Wichtige Eingangsgrößen der Modelle

Meteorologische Größen spielen bei Entwicklung und Wachstum von Pflanzen eine entscheidende Rolle. Die Einstrahlung der Sonne ist die treibende Energiequelle für die Photosynthese, die als zentraler Prozess der pflanzlichen Biomassebildung für die Umwandlung von CO<sub>2</sub> in Kohlenhydrate sorgt. Wesentlich für die Adsorption der Strahlung ist die Geometrie der Blätter, die in den meisten Modellen über den Blattflächenindex berücksichtigt wird und aus der gebildeten Blattmasse errechnet werden kann (siehe Abb. 4.1.3).

Die Temperatur hat einen generellen Einfluss auf zentrale Funktionen des Wachstums, da viele biochemische Prozesse in ihrer Geschwindigkeit eine deutliche Temperaturabhängigkeit zeigen. Die sogenannten Kardinalpunkte (Abb. 4.3.1)

Abb. 4.3.1: Temperaturabhängigkeit der Bruttphotosynthese und der Atmung von C3-Pflanzen. Kardinalpunkte: 1 Minimumtemperatur Bruttoassimilation, 2 Optimum für Bruttoassimilation, 3 Optimum der Atmung, 4 Maximaltemperatur Bruttoassimilation, 5 Temperaturmaximum Atmung, 6 Optimum der Nettoassimilation/Biomassebildung.



beschreiben Schlüsseltemperaturen, mit denen sich Pflanzen generell charakterisieren lassen.

So lässt sich die Dauer der für das Pflanzenwachstum möglichen Vegetationsperiode durch die Termine festlegen, an denen diese Temperatur an mehreren Tagen hintereinander über- bzw. unterschritten wird. Abbildung 4.3.1 zeigt den Zusammenhang zwischen der Temperatur und der Photosynthese als Prozess der Brutto-Biomassebildung sowie dem gegenläufigen Prozess der Atmung, die assimilierten Kohlenstoff wieder zu Sauerstoff abbaut. Aus der Differenz resultiert das eigentliche Biomassewachstum der Pflanze. C4-Pflanzen, wie Mais, zeigen ein höheres Temperaturoptimum hinsichtlich der Netto-Assimilation als die C3-Pflanzen, zu denen die meisten Getreidearten gehören.

Bei Standorten in warmen Klimaregionen kann eine weitere Temperaturerhöhung bereits zum Überschreiten des Optimums führen, während kühlere Gebiete, z. B. höhere Lagen von der globalen Erwärmung profitieren können. Neben dieser generellen Temperaturabhängigkeit können in einzelnen Phasen auch extrem hohe Temperaturen Schäden z. B. bei der Ausbildung von Körnern bei Getreide hervorrufen. Getreidepflanzen sind hier, insbesondere kurz nach der Blüte, empfindlich.

Die Verfügbarkeit von Wasser ist einer der am häufigsten limitierenden Faktoren für das Pflanzenwachstum. Die Verfügbarkeit von Wasser bestimmt auch den Gasaustausch zwischen Atmosphäre und Blättern, da bei nicht ausreichender Wasserversorgung die Spaltöffnungen der Blätter geschlossen werden und somit auch der  $\text{CO}_2$ -Fluss für die Photosynthese in das Blattinnere behindert wird. Ob die Wasserversorgung der Pflanze zu einem Stressfaktor werden kann, hängt neben der Höhe und Verteilung der Niederschläge vor allem auch von der Speicherfähigkeit des Bodens ab, der der Pflanze Wasser aus dem Bodenvorrat zur Verfügung

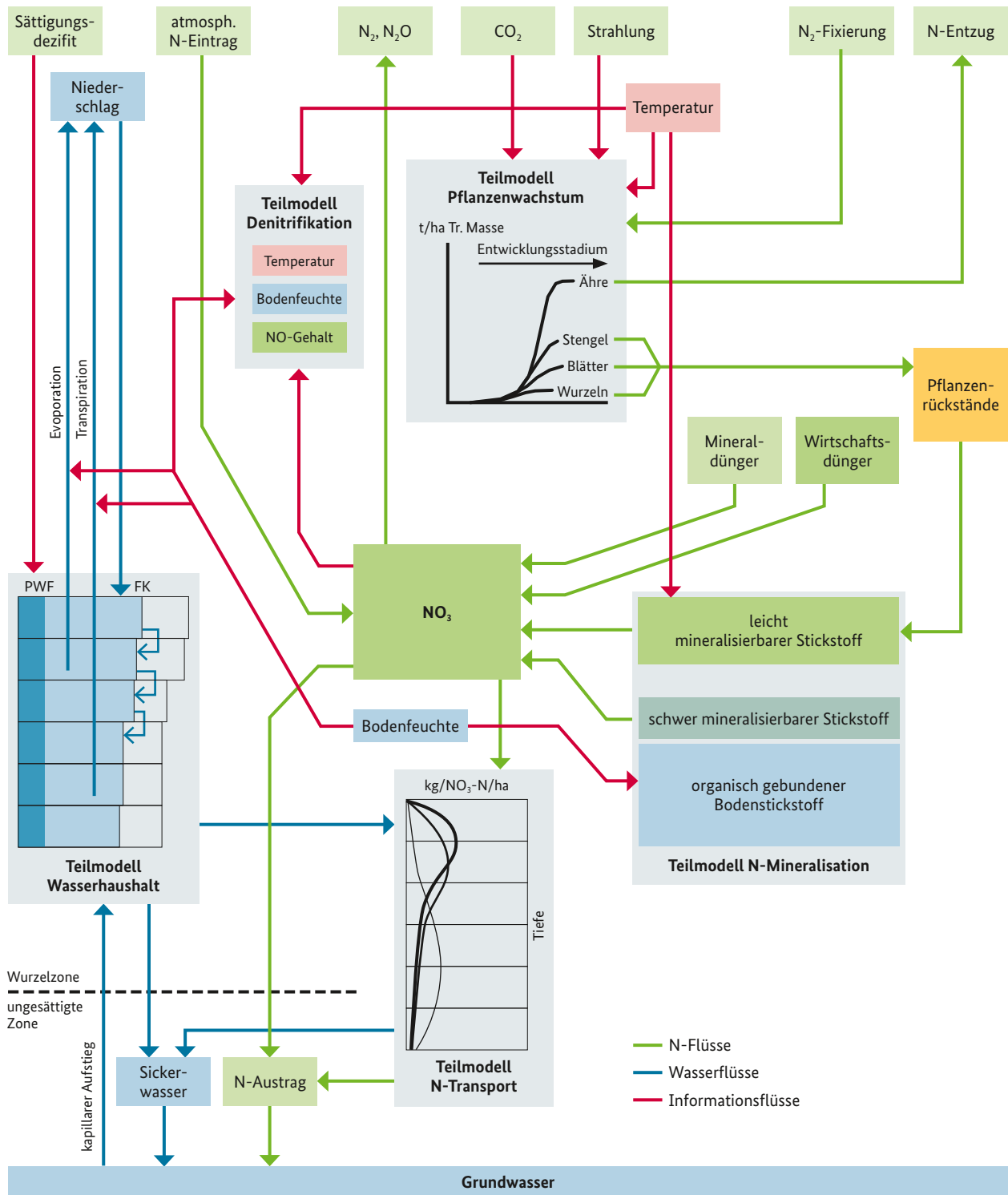
stellen kann und somit vorübergehend einige Tage ohne Regen ausgleichen kann.

Das Sättigungsdefizit für Wasserdampf, also die Differenz zwischen dem temperaturspezifischen Sättigungsdampfdruck der Luft und dem aktuellen Dampfdruck, ist die treibende Größe für die Verdunstung. Daneben spielt die Windgeschwindigkeit eine Rolle, die für einen ständigen Austausch der Luftschicht über der verdunstenden Oberfläche sorgt. Durch den Transpirationsstrom des Wassers wird auch der Fluss von Nährstoffen in und innerhalb der Pflanzen mit beeinflusst.

Die meisten prozessbasierten Pflanzenwachstums- bzw. Ertragsmodelle arbeiten mit meteorologischen Eingangsgrößen (Lufttemperatur (Mittel, Minimum, Maximum), Niederschlag, rel. Luftfeuchte, Globalstrahlung, ggf. Windgeschwindigkeit) in Tagesauflösung. Sie beschreiben meist neben den eigentlichen Prozessen in der Pflanze auch den Wasserhaushalt und ggf. die Nährstoffdynamik im Boden. In diesen Agrarökosystemmodellen werden zu jedem Zeitschritt die jeweiligen Witterungsgrößen als Steuergrößen verwendet, um mehrere Prozesse im System Boden-Pflanze gleichzeitig zu simulieren.

Die sich jeweils einstellenden Zustände beeinflussen im nächsten Zeitschritt sowohl ihren eigenen weiteren Verlauf, stehen aber auch mit anderen Prozessen in Wechselwirkung. So ist zum Beispiel die Absorption der Sonnenstrahlung zu einem Zeitpunkt abhängig von der bereits gebildeten Blattfläche und die Wasser- und Nährstoffaufnahme hängt sowohl vom Wasser- bzw. mineralischen Stickstoffgehalt als auch von der zuvor gebildeten Wurzelverteilung ab. Abbildung 4.3.2 zeigt ein vereinfachtes Schema des prozessorientierten Simulationsmodells HERMES (Kersebaum, 2007) mit einigen sich gegenseitig beeinflussenden Prozessen in Boden und Pflanze.

Abb. 4.3.2: Schema des Boden-Pflanze Modells HERMES



Das Modell kann verschiedene Kulturarten über externe Parameterdateien abbilden und ist dadurch auch in der Lage, mehrjährige Fruchtfolgen zu simulieren. Der Ertrag wird aus der im Speicherorgan gebildeten Biomasse (z.B. Rübe oder Ähre, siehe Abb. 4.1.3) abgeleitet. Neben dem Ertrag lässt sich auch der Stickstoff- und Wasserbedarf für einzelne Kulturarten ableiten. Das Modell HERMES wurde mit dem Modell AMBAV des DWD gekoppelt.

#### 4.4 Bestandesklimamodelle

Die Kenntnis der mikrometeorologischen Bedingungen innerhalb eines Pflanzenbestandes ist aus vielerlei Gründen von Interesse. Die Temperatur- und Feuchtebedingungen im Bestand haben Einfluss auf das Wachstum der Pflanzen. Zusammen mit der Blattbenetzung sind sie die dominierenden

Faktoren für die Ausbreitung von Pflanzenkrankheiten und -schädlingen. Die Blattbenetzung lässt sich in der Praxis nur schwer ermitteln. Mit aufwändigen Untersuchungen und Experimenten wurde die Grundlage für ein Blattnässemodell geschaffen. Ein wichtiger Eingangsparameter ist die Blattbenetzung für zahlreiche Anschlussmodelle, die sich mit der Ausbreitung von Pflanzenkrankheiten oder der Optimierung des Einsatzzeitpunkts von Pflanzenschutzmaßnahmen befassen.

Die zuverlässige Bestimmung der Temperatur an den oberen Pflanzenteilen, insbesondere ihres Minimums, ist z. B. für die Nachtfrostvorhersage erforderlich. An Tagen mit großem Tagesgang lassen sich Temperaturdifferenzen von 2 K zwischen den Messungen im und außerhalb eines Bestandes (bezogen auf eine einheitliche Messhöhe von 0,5 m, Abbildung 4.4.1) feststellen. Es können sich allerdings durchaus auch Temperaturunterschiede von 5 K zwischen den Pflanzenoberflächen und der Standardmesshöhe ergeben, wie später in Kapitel 6.8.1 am Beispiel eines Rebbestandes gezeigt wird (Abbildung 6.8.3). Da sich das Mikroklima im Bestand grundlegend von den üblichen gemessenen meteorologischen Größen unterscheidet, wird über Bestandsklimamodelle versucht, die meteorologischen Bedingungen im Bestand zu simulieren.

Der DWD verwendet das Modell BEKLIMA zur Simulation eines gekoppelten physikalischen Systems aus Boden, Pflanzen und Atmosphäre. Es bildet den Wasser-, Energie- und Strahlungshaushalt zwischen diesen Komponenten ab und dient zur Berechnung landwirtschaftlich relevanter

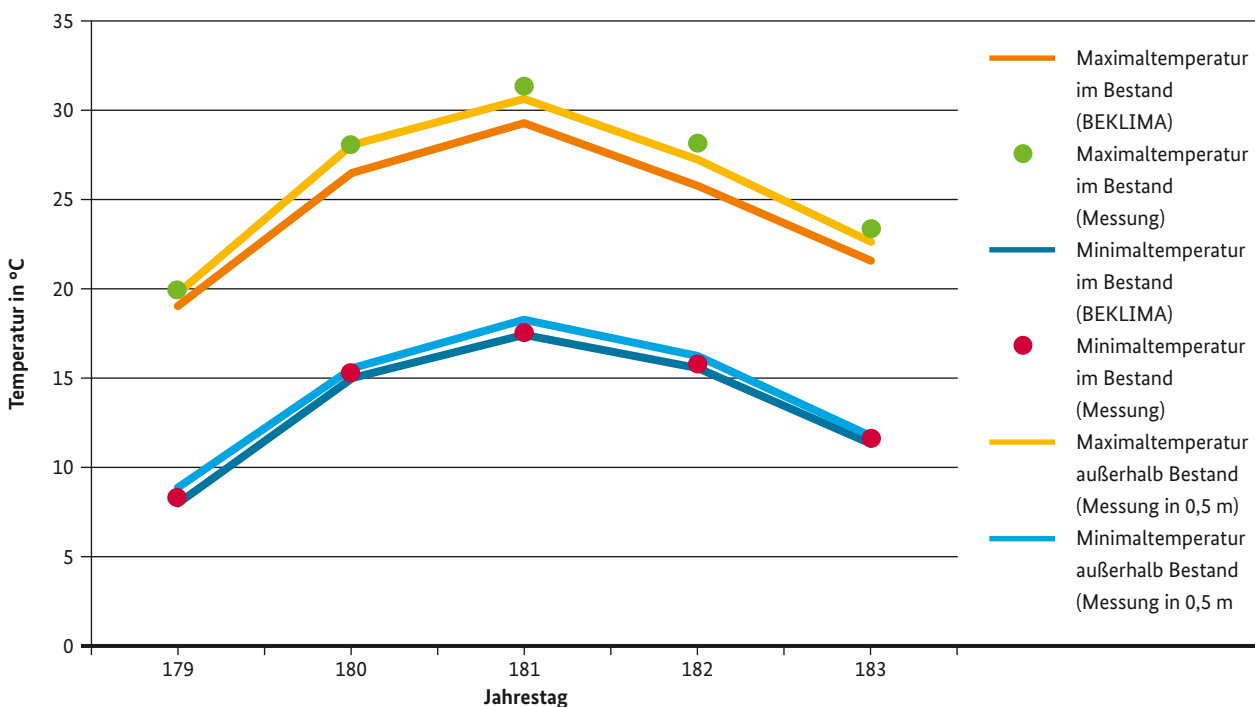
Parameter. Ein Beispiel für einen mehrtägigen Verlauf der gemessenen und modellierten Temperaturen innerhalb und außerhalb eines Winterweizenbestandes ist in Abbildung 4.4.1 dargestellt. Die mit BEKLIMA berechneten Werte für Temperatur, Feuchte und Blattnässe innerhalb des Bestandes dienen als Eingangsgrößen für weitere agrarmeteorologische Modelle.

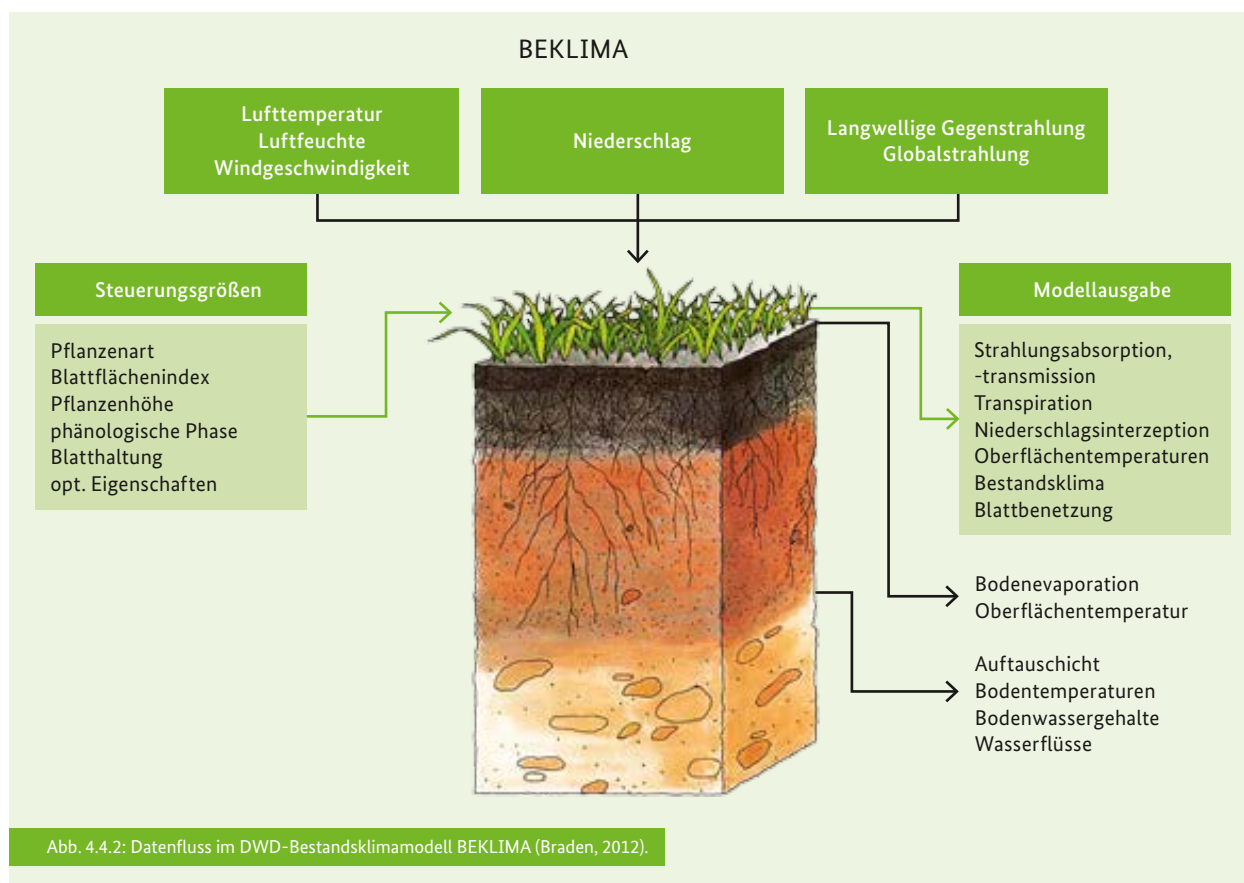
Das Modell kann auf alle gängigen Anbaukulturen der gemäßigten Klimazone (Getreide, Mais, Zuckerrüben, Raps, Grünland, Kartoffeln, Nadel- und Laubwald) sowie unbewachsenem Boden angewendet werden. Die prozentuale Zusammensetzung des Modellbodens bzgl. der Bestandteile Sand, Schluff und Ton ist unbeschränkt wählbar.

Basierend auf dem Prinzip eines SVAT(Soil-Vegetation-Atmospheric Transfer)-Modells, berechnet BEKLIMA die Energie- und Wasserflüsse zwischen den Komponenten Boden, Bestand und Atmosphäre. Entsprechend gehört es auch zu den Fähigkeiten des Modells, das physikalische Verhalten einer Schneedecke zu simulieren. Ausgangspunkt ist die Anfangsdichte des Schnees. Mithilfe der Veränderung der Lufttemperatur wird das Abtauen des Schnees bzw. das Wiedergefrieren (Erhöhung der Dichte) nachgebildet. Auf diese Weise kann die Schneehöhe, von der die Bodentemperatur und die Frosteindringtiefe abhängen, jederzeit für verschiedene Kulturen und Böden berechnet werden.

Das Bestandsklimamodell BEKLIMA ist sehr rechenzeitintensiv und liefert alle agrarmeteorologisch relevanten Größen. Um eine realistische Temperaturverteilung im Boden

Abb. 4.4.1: Tägliche Maximal- und Minimaltemperaturen innerhalb und außerhalb eines Winterweizenbestandes am ZAMF Braunschweig (27. 6 bis 02.7.2012)





simulieren zu können, bedarf es besonders an der Erdoberfläche einer feinen Höhenabstufung im Modell, die in größeren Tiefen immer gröber wird. In 13 m Tiefe verschwindet die Jahresamplitude der Bodentemperatur. Als einzige Randbedingung wird in dieser Tiefe die mittlere Jahrestemperatur an der betrachteten Station genommen. Der Rest des Antriebes erfolgt ausschließlich über die atmosphärischen Parameter.

Um die Wechselwirkungen zwischen Luft, Bestand und Boden möglichst genau zu simulieren, ist eine genaue Kenntnis der Bestandsparameter Bestandshöhe, Blattflächenindex, Bestandsdichte sowie der Wurzelverteilung zum jeweiligen Entwicklungsstand erforderlich, die nach den im Kapitel 4.1.1 beschriebenen Verfahren berechnet werden.

Als Eingangsdaten werden die stündlichen Werte zahlreicher meteorologischer Parameter benötigt. Hierzu zählen einerseits Temperatur, relative Feuchte, Niederschlagsmenge und Windgeschwindigkeit, andererseits auch die (nicht an allen Wetterstationen erfasste) kurzweilige und langweilige Strahlung (Globalstrahlung bzw. Gegenstrahlung der Atmosphäre). Für zurückliegende Zeiträume kommen stationsbasierte Messwerte, für die Zukunft Modellwerte aus der numerischen Wettervorhersage zum Einsatz, sodass die Berechnung mit BEKLIMA im Rahmen der agrarmeteorologischen Beratung des DWD für die folgenden sieben Tage stets möglich ist. Der Datenfluss im BEKLIMA ist in Abbildung 4.4.2 veranschaulicht.

Gerade die feine Höhenabstufung an der Erdoberfläche erschwert die Berechnung der Bodenfeuchte, da diese sich schlagartig nach Niederschlagsereignissen verändern kann. Diese starken Änderungen können bei der Lösung der Modellansätze zu Problemen führen und machen sehr geringe Zeitschritte erforderlich. Aus diesem Grunde wurde mit dem Modell AMBAV ein Bodenwassermodell entwickelt, das eine im Vergleich zum BEKLIMA vereinfachte Bodenphysik auf einer gleichmäßig eingeteilten Vertikalskala aufweist.

Neben der Bodenfeuchte in 10cm-Schichten von 0 bis 60 cm Tiefe berechnet AMBAV für nahezu alle auch in BEKLIMA berücksichtigten Kulturen die aktuelle Verdunstung, wobei der Anteil des Bodens (Evaporation) und der Pflanzen (Transpiration) berücksichtigt wird. Berechnungen für unbewachsenen Boden sind jedoch nicht vorgesehen. Um auf die aktuellen Verdunstungswerte zu schließen, geht AMBAV von einer potenziellen Pflanzenverdunstung aus und reduziert diese, wobei das Wassersättigungsdefizit des Bodens sowie das Verhalten der Blattstomata bei Trockenstress berücksichtigt werden.

Die Bodentemperaturen und -feuchten bestimmen Keim- und Wachstumsvorgänge sowie die Bodenbefahrbarkeit und haben damit wesentlichen Einfluss auf viele landwirtschaftliche Arbeiten. Auch die Ableitung der Bodenfrost eindringtiefen, die über die Zulässigkeit der Düngung entscheidet, setzt eine physikalisch zuverlässige und hochaufgelöste Modellierung der Bodentemperaturen und -feuchten

voraus. Hohe Anforderungen stellt besonders die Modellierung der Temperaturverläufe der obersten Bodenschicht und nahe der Erdoberfläche, da sie z. B. die Ammoniakverflüchtigung bei der Gülleausbringung ganz entscheidend beeinflussen.

In den Themenkomplex des Bodenklimas fällt auch die Bestimmung der bodennahen Lufttemperatur, insbesondere die des sogenannten Erdbodenminimums (5 cm oberhalb der Oberfläche), die z. B. als Bodenfrostvorhersage eine besondere Bedeutung hat. Die Temperatur in Bodennähe kann in windschwachen Strahlungsnächten erheblich von der Temperatur in der Standardmesshöhe (2m) abweichen.

#### 4.5 Verwendung und Einsatz agrarmeteorologischer Modelle

Aus der Beschreibung der hier im Kapitel vorgestellten Modelle wird schnell klar, dass fast immer ein meteorologischer oder pflanzenphysiologischer Input als Antrieb benötigt wird, der durch Einführung neuer Messtechnik, der Verdichtung von Messnetzen sowie Nutzung von moderner Telekommunikation und Sattelitendaten immer kleinräumiger und schneller erfasst und somit für die agrarmeteorologischen Modelle genutzt werden kann.

Damit die Modelle auch in der Fläche angewendet werden können, sollten die Eingangsgrößen flächendeckend bekannt sein. Werden Spezialmessgrößen als Input in den Modellen benötigt, die nur mit hohem Aufwand an wenigen Orten erhoben werden, so ist die Anwendbarkeit der Modellergebnisse räumlich begrenzt. Auf der anderen Seite sind solche häufig in Forschungsvorhaben durchgeführten Spezialmessungen wichtig, um physikalische Zusammenhänge zu verstehen, die dann evtl. wieder durch vereinfachende Beziehungen beschrieben werden können und in die Modelle Eingang finden.

Alle vorgestellten Modelle haben einen für die Landwirtschaft wichtigen Output, der unmittelbar genutzt werden kann. So lassen sich aus den aktuellen Bodenfeuchten ein Beregnungsbedarf oder die Befahrbarkeit des Ackers ableiten oder aus dem vergangenen Wettergeschehen die bisherigen Ertragsaussichten abschätzen oder aus dem Entwicklungsstand der Kulturen direkt der Düngebedarf erkennen. Über den Witterungsverlauf im Winter kann der Mineralisierungsgrad von Stickstoff bestimmt werden und somit die im Frühjahr zur Verfügung stehenden Stickstoffvorräte im Boden für die benötigte Düngermenge während der Saison berücksichtigt werden.

Ein noch größerer Mehrwert entsteht, wenn diese Modelle direkt mit der Wettervorhersage oder den Klimaprojektionen verknüpft werden, da unmittelbar planerische Tätigkeiten abgeleitet werden können, die aufgrund der komplexen Zusammenhänge sonst nicht im Detail bekannt und überschaubar wären.

Vergleichbar der normalen Klimaauswertung kann mit den berechneten agrarmeteorologischen Größen ein Agrarklima erhoben werden. Hieraus lassen sich wie bei der richtigen Klimatologie Mittelwerte und Extremwerte für unterschiedliche Zeitintervalle bilden oder es kann abgeschätzt werden, wie häufig ein Zustand auftritt (siehe auch Kapitel 8). Außerdem können Kulturen virtuell an verschiedenen Orten angebaut und deren Entwicklung bei gegebenen klimatischen Bedingungen und Bodeneigenschaften simuliert werden. Damit können Anbaueignung und Ertragsaussichten sowie das Anbaurisiko für neue Kulturen abgeschätzt werden.

Ein weiterer bisher noch nicht angesprochener Nutzen ist die Verwendung der Ergebnisse der Bestandsklimamodelle als Input für andere agrarmeteorologische Modelle. So kann das für eine Kultur berechnete Bestandsklima als Eingangsgröße für verschiedene phytopathologische Modelle dienen. Beispiele für diese Anwendungen werden in Kapitel 6 ausführlich beschrieben. Aufgrund der vielfältigen Sorten und unterschiedlichen Entwicklungsstadien in einer Region ist es oft schwierig, allgemeingültige Aussagen zu treffen. In diesen Fällen werden verschiedene Varianten berechnet. Der Nutzer muss sich aus diesen Varianten, die für ihn passende Situation selbst herausuchen.

Das Potential der agrarmeteorologischen Modelle ist aufgrund der zurzeit noch fehlenden kleinräumigen meteorologischen und kulturspezifischen Informationen noch nicht vollständig ausgeschöpft. Durch die immer weiter voranschreitende Fernerkundung sowie die onlinefähigen Verknüpfungsmöglichkeiten diverser Datenquellen durch moderne Web Services wird sicher auch die Agrarmeteorologie der Zukunft noch wichtige Verbesserungen in der Modellierung erreichen.

Die in der agrarmeteorologischen Forschung und Beratung eingesetzten Modelle sind einzelne Module des Softwarepaketes AMBER (AgrarMeteorologische BERatung) des DWD.

#### Literatur

Braden, H. (2012). Agrarmeteorologische Modelle des Wasser- und Energiehaushalts im Deutschen Wetterdienst. Promet Meteorologische Fortbildung, S. 11-19.

Kersebaum, K.C. (2007): Modelling nitrogen dynamics in soil-crop systems with HERMES. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 77, 39-52.



## 5 Gelände- und Bestandsklima

*Autor: Klaus-Peter Wittich*

In diesem Kapitel soll einigen agrarklimatologischen Fragestellungen nachgegangen werden, die – in Ergänzung zu Kapitel 2 – bei der Anbauplanung eine Rolle spielen können. Hierzu gehören neben natürlichen geländebedingten Einflüssen auch technische Möglichkeiten der bestandsklimatischen Beeinflussung. Zudem werden interessante Rückkopplungseffekte angesprochen, die sich durch natürliche oder künstliche Veränderungen der Landoberfläche ergeben.

## 5.1 Auswirkungen von Boden- und Geländeklima auf die landwirtschaftliche Pflanzenproduktion

Konkurrenz- und Durchsetzungskraft natürlicher Vegetationsformen sowie der Anbauerfolg landwirtschaftlicher Kulturen richten sich nach klimatischen, bodenphysikalischen und geländebedingten Gegebenheiten, wobei letztere auf das Mikroklima rückwirken. So können Geländeformen anbauwidrige Kaltluftansammlungen oder anbaufördernde Wärmegewinne begünstigen und, in Verbindung mit den anstehenden Bodenarten, betriebliche Anbauentscheidungen beeinflussen.

### 5.1.1 Nachteil von Senken: Kaltluftseen

Infolge abendlicher Abkühlung erhöht sich die Dichte der bodenaufliegenden Luftschicht, so dass diese in Hangbereichen in Richtung Mulde oder Tal abzufließen beginnt. Im Laufe der Nacht sammelt sich die Kaltluft im Bereich der Profilsohle und bildet einen Kaltluftsee. Um nicht unnötige Frostschäden zu riskieren, sollte dieser geländetypische Effekt im Fall einer Anbauentscheidung bedacht werden, zumal von ihm nicht nur flachwüchsige sondern auch hochwüchsige Kulturen wie Obst und Wein über ihre gesamte Bestandshöhe erfasst werden können.

**Abb. 5.1.1** zeigt in Falschfarbendarstellung die zeitliche Abfolge zweier Thermografie-Aufnahmen entlang einer geneigten Rebasse. Zur besseren Orientierung ist ein Bild einer Digitalkamera hinzugefügt, welches die visuelle Bestands- und Geländegeometrie erfasst. Die Blickrichtung der Kameras ist hangabwärts nach Süden gerichtet. Am unteren Ende der Rebasse befindet sich eine Mulde, hinter der das vegetationsbedeckte Gelände wieder ansteigt. Die thermografische Situation links im Bild gibt die Oberflächentemperatur gegen Sonnenhöchststand wieder. Das transpirierende Reblaub weist eine Blatttemperatur von ca. 25 – 30 °C auf, was der Muldentemperatur im Hintergrund entspricht. Bis zum folgenden Morgen sinkt das Temperaturniveau um

mehr als 15 °C ab, wobei im Muldenbereich ein Kaltluftsee mit einer Temperatur von 8,6 °C nachweisbar ist.

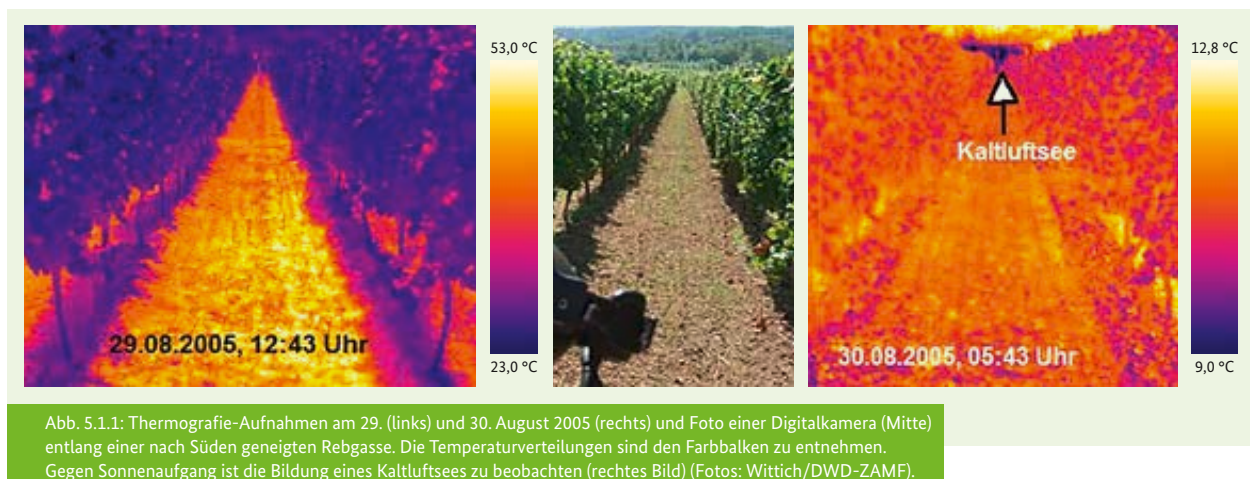
Da bei nächtlicher Abkühlung sich die Lufttemperatur dem Taupunkt nähert, können sich kaltluftsammlende Mulden- und Tallagen durch erhöhte Luftfeuchtigkeit, Tau- und Nebelbildung auszeichnen. Pilzliche Erreger ziehen Nutzen aus den ausgedehnten Nässeperioden, da sie längere Zeit günstige Bedingungen vorfinden, um auf Blättern Läsionen entstehen zu lassen.

Unter dem Taupunkt wird jene Temperatur verstanden, auf die Luft abgekühlt werden muss, damit der in ihr enthaltene Wasserdampf zu flüssigem Wasser kondensiert. Die Luft ist zu diesem Zeitpunkt durch Wasserdampfsättigung und damit durch eine relative Luftfeuchte von 100 % definiert. In der Regel kommt es zu Nebelbildung.

### 5.1.2 Vorteil von Hanglagen: Wärmegunst

Während Mulden- und Tallagen aufgrund der nächtlichen Kaltluftansammlung Anbaurisiken bergen, lässt sich das Mikroklima von Hängen gezielt für den Anbau wärmeliebender Kulturen bzw. für die beschleunigte Pflanzenentwicklung nutzen. Hintergrund dieses Effektes ist, dass die Sonnenstrahlen in unseren Breiten nicht senkrecht, sondern flach einfallen und die Strahlungsintensität auf einer senkrecht zur Einfallrichtung ausgerichteten Empfängerfläche höher ist als auf der Horizontalebene. Folgerichtig bevorzugen Winzer die wärmebegünstigten Südhänge für den Anbau von Weinreben, zumal im europäischen Vergleich die deutschen Anbauregionen an der nördlichen (kühlen) Grenze des klimatisch vertretbaren Anbaus liegen.

Lichteinstrahlung und Temperatur sind ebenfalls relevante Standortfaktoren bei der Grünlandnutzung (Berendonk, 2011). Auf warmen Südhängen kann im Frühjahr eher mit





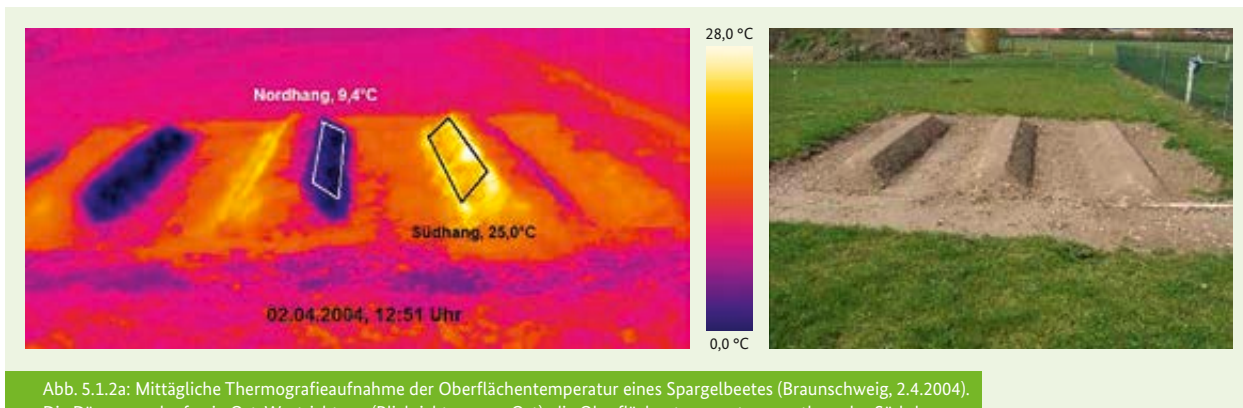
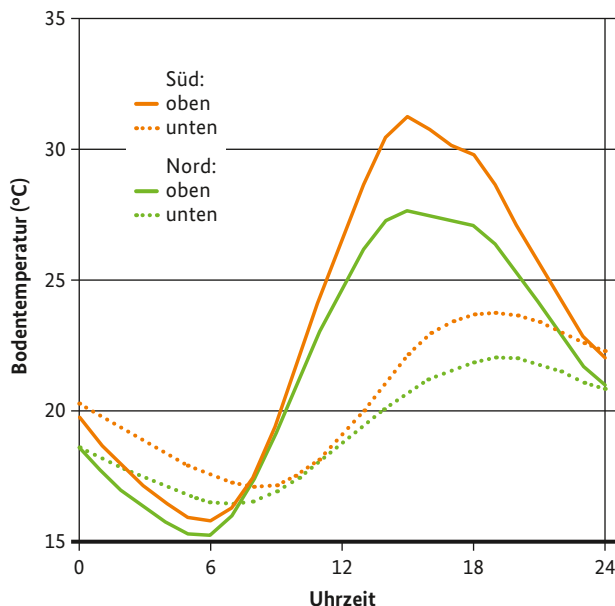


Abb. 5.1.2a: Mittägliche Thermografieaufnahme der Oberflächentemperatur eines Spargelbeetes (Braunschweig, 2.4.2004). Die Dämme verlaufen in Ost-Westrichtung (Blickrichtung aus Ost); die Oberflächentemperaturen entlang des Süd- bzw. Nordhangs betragen 25,0 bzw. 9,4 °C (Foto: Wittich/ZAMF Braunschweig).

der Schnittnutzung oder Beweidung begonnen werden als auf den Nordhängen. Im Rahmen des Betriebsmanagements hat dies erhebliche Auswirkungen auf die Silagegewinnung und auf die Bemessung der Weideperiode. Ausführliche Darlegungen zur Grünlandbewirtschaftung und dem Einfluss des Klimas und der Witterung finden sich im Kapitel 6.5.

Ähnliche geländebedingte Temperatureffekte treten auch im deutlich kleineren Maßstab auf. So wies bereits Geiger (1961) auf asymmetrische Temperaturverteilungen in 15 cm hohen „Häufelreihen“ mit „Übertemperaturen gegenüber dem ebenen Boden“ hin. In ähnlicher Weise zeigt Abb. 5.1.2a ein Spargelbeet mit Hügelreihen, die in Ost-Westrichtung angelegt wurden. Gegen Mittag erfolgte eine Thermografieaufnahme aus östlicher Richtung, um den Unterschied der Bodenoberflächentemperatur auf den nach Süd und Nord geneigten Flächen kenntlich zu machen.

Abb. 5.1.2b: Tagesgang der Bodentemperaturen in 10 cm und 25 cm Tiefe („oben“, „unten“) eines ost-westwärts verlaufenden Spargeldamms am 22.5.2016 (Messort: Braunschweig). Die roten Kurven sind im Südbereich, die grünen Kurven im Nordbereich der 45 cm hohen Aufschüttung gemessen.



Die nach Süden geneigte Hügelfläche wies deutlich höhere Temperaturen auf als die nach Norden geneigte, wobei der Temperaturunterschied bei ca. 15 °C lag. Im Spargelanbau ließe sich der Wärmegewinn bei entsprechender Ausrichtung der Hügelreihen nutzen. Verstärkt würde dieser positive Effekt bei einer asymmetrischen, etwas nach Nord versetzten Hügelaufschüttung, so dass die Spargelstangen den Damm in Nähe der südlichen Kante durchbrechen. Zu bedenken ist allerdings, dass die tagesperiodische Temperaturwelle mit zunehmender Tiefe gedämpft wird, weshalb die zusätzliche Gesamtwärmewirkung etwas gemildert und sich wohl nur durch eine geringe Wachstumsbeschleunigung bemerkbar machen wird.

Abb. 5.1.2b zeigt derartige Temperaturverläufe innerhalb eines ost-west-orientierten Spargeldamms, gemessen in 10 und 25 cm Tiefe unterhalb der Dammkrone. Jeweils zwei vertikal angeordnete Messpunkte liegen auf der südlichen Seite des Damms, die anderen zwei Punkte auf der nördlichen Seite, und zwar jeweils um 10 cm mittig versetzt von den beiden oberen Dammkanten. Der nachmittägliche Wärmegewinn im Südbereich des Damms liegt – gegenüber dem Nordbereich – nahezu ganztägig bei 1 - 4 °C.

Im erwerbsmäßigen Großflächen-Spargelanbau wird es in der Regel nicht möglich sein, die Ausrichtung der Dämme nachträglich zu verändern. Infolgedessen finden andere Methoden der Wärmegewinnung Anwendung, z.B. der Einsatz von Mulchfolien oder Minitunneln, um eine Ernteverfrüherung zu ermöglichen.

## 5.2 Feldtechnische Beeinflussung des Mikroklimas

Neben der gezielten Ausnutzung oder der gezielten Vermeidung geländetypischer Auswirkungen auf den Kulturanbau ist es üblich, einfache Anbautechniken zu nutzen, um das Mikroklima wachstumsfördernd zu gestalten.

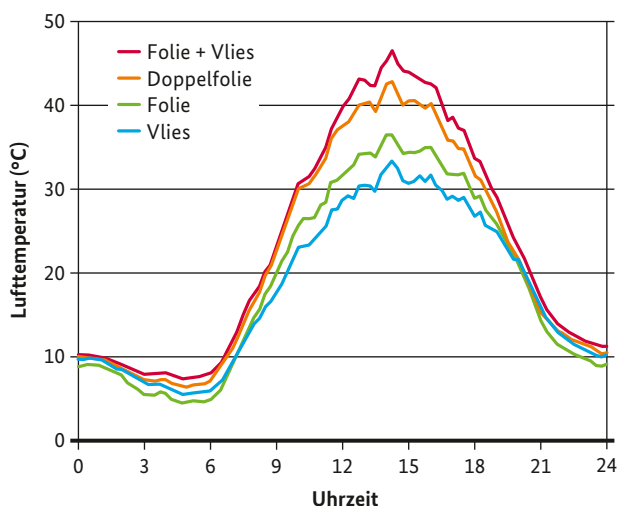
### 5.2.1 Mikroklimatischer Wärmegewinn durch Folien- und Vliesabdeckungen

Für pflanzliches Wachstum und landwirtschaftlichen Ertrag ist - neben dem Niederschlag - die Bestandstemperatur eine der wichtigsten Größen. Da sie durch technische Maßnahmen relativ einfach zu beeinflussen ist, ist es naheliegend, sie zur Steuerung der pflanzlichen Entwicklung zu nutzen; denn ein optimales mikroklimatisches Bestandsmilieu führt zu einem Wachstums- bzw. Reifevorsprung und damit zu einer vorteilhaft frühen Marktverfügbarkeit des Ernteguts.

Eines der bewährten Mittel, um einen Wärmegewinn durch Veränderung strahlungsphysikalischer und strömungsdynamischer Größen im Bestandsraum zu erzielen, ist die Abdeckung der Pflanzen mit Folien oder Vlies. So beträgt die Windgeschwindigkeit im abgedeckten Bestandsraum lediglich 20 bis 25 Prozent des unter Freilandbedingungen erwarteten Wertes, wobei die folienbedingte Dämpfung oder gar Unterdrückung des vertikalen Luftaustausches in Kombination mit optimal gewählten Reflexions- und Transmissions-eigenschaften der Folie zu einer deutlichen Erhöhung der Bestandstemperatur führen kann.

Zudem spielt im Unterfolienanbau die Auflagedicke eine Rolle, wie z.B. die Verwendung von einfacher oder doppelter Lochfolie. In **Abb. 5.2.1a** sind gemessene Temperaturwirkungen von unterschiedlichen bzw. kombinierten Abdeckungen dargestellt. Die Folien wurden über einen seitlich geschlossenen Lattenrahmen (B x T x H: 2 m x 2 m x 0.3 m) gespannt, so dass die horizontale Luftbewegung unterbunden war. Die Temperaturmessungen erfolgten in 0.1 m Höhe innerhalb des Rahmens auf einer Schwarzbrache. Der Messtag (Mitte Mai) war unbewölkt, so dass auf einer Nachbarfläche die Lufttemperatur in 2 m Höhe über Gras auf einen nachmit-

**Abb. 5.2.1a:** Wirkung verschiedener Abdeckungen auf die Lufttemperatur in 10 cm Höhe über einer Schwarzbrache bei unterdrückter horizontaler Luftbewegung (Braunschweig, 13.5.2000). Die nachmittägliche maximale Lufttemperatur in 2 m Messhöhe über Gras erreichte 20.7 °C.

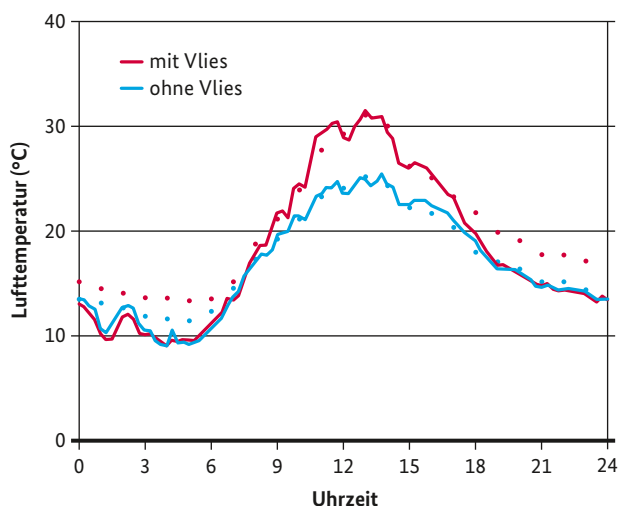


täglichen Wert von 20.7 °C stieg. **Abb. 5.2.1a** zeigt, dass eine Kombination aus Folie und Vlies die extremste Temperaturerhöhung von ca. 15 °C gegenüber einer einfachen Vliesauflage erzielte, gefolgt von der doppelten und einfachen Folienuflage.

Um den Einfluss einer Vliesabdeckung auf das Mikroklima einer Kultur zu verdeutlichen, erfolgten in 10 cm Höhe eines Kartoffelfeldes Temperaturmessungen unterhalb und außerhalb der Abdeckung. **Abb. 5.2.1b** zeigt, dass eine Vliesauflage die Bestandstemperatur um bis zu 6 °C gegenüber der unbedeckten, vliesfreien Messposition im Freiland erhöhen kann. Die Vliesabdeckung lässt in ausreichendem Maß die Sonnenstrahlung passieren, was zu einem Temperaturanstieg von Boden und Pflanzen führt, und verhindert gleichzeitig die windbedingte Wärmeabgabe an die äußere kühlere Atmosphäre. Darüber hinaus wird die vom Bestand abgegebene thermische Strahlung vom Vlies teilweise absorbiert und von ihm als vliespezifische Wärmestrahlung sowohl nach außen in Richtung Atmosphäre als auch nach innen in Richtung Bestandsraum abgestrahlt. Dadurch erwärmt sich die Bestandsluft solange weiter, bis sich ein Gleichgewicht zwischen allen wechselseitigen Wärme- und Strahlungstransporten einstellt.

Um das Mikroklima des Unterfolienanbaus mit all seinen wechselwirkenden Prozessen theoretisch zu beschreiben und zu prognostizieren, bedarf es einer physikalischen Modellsimulation. **Abb. 5.2.1b** zeigt die modellierten bestandsklimatischen Varianten „mit Vlies“ und „ohne Vlies“, berechnet mithilfe des Bestandsklimamodells des Deutschen Wetterdienstes (Braden, 2005). Die Modellergebnisse zeigen während der wachstumsrelevanten Tageslichtstunden eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten.

**Abb. 5.2.1b:** Tagesgang der Temperatur unterhalb bzw. außerhalb einer Vliesabdeckung im Kartoffelbestand mit lehmigen Sand als Untergrund (Messhöhe: 10 cm). Messwerte sind durchgezogen, berechnete Werte sind gepunktet (Braunschweig, 1.5.2004).



### 5.2.2 Frostabwehr

Frostereignisse werden hervorgerufen sowohl durch großräumig einfließende Polarluft bzw. kontinentale Kaltluft, als auch durch nächtliche Ausstrahlung der Erdoberfläche bei nahezu wolkenlosem Himmel (s. Schnelle, 1965). Je nach Entwicklungsstadium der Pflanzen kann das Auftreten von Frost negative Auswirkungen auf die Erntequalität oder die Erntemenge haben.

Üblicherweise schützt sich Vegetation vor Erfrierung durch Eintritt in die Winterruhe, d.h. durch innere pflanzenchemische und -physikalische Prozesse, die verhindern, dass z.B. im Herbst angelegte reproduktive Organe durch winterliche Frosteinwirkung Schaden nehmen. Allerdings können Früh- und Spätfroste jenseits der Ruhephase, d.h. wenn die interne Regulation noch nicht oder nicht mehr wirksam ist, schädigend wirken.

Generell reagieren aufeinanderfolgende Entwicklungsstadien einer Pflanze unterschiedlich empfindlich auf Frosteinwirkung. Dabei tolerieren frühe Pflanzenphasen nahe der genetisch etablierten winterlichen Frosthärtephase (z.B. im Februar) eine höhere Frostintensität als späte Pflanzenphasen des Frühjahrs (z.B. im Mai), die bereits bei Temperaturen unter  $-2\text{ °C}$  geschädigt werden können. Problematisch sind vor allem Fröste, wenn sie in den Zeitraum der Blüte fallen, da sie Ertragsausfälle nach sich ziehen können.

Um Spätfrostschäden zu verhindern, haben sich bei flachwüchsigen Kulturen (wie z.B. Frühkartoffeln) Abdeckungen mit Folie oder Vlies bewährt. Die Abdeckungen kühlen stärker als der darunter liegende Blattapparat ab, wobei der Pflanzenkörper zusätzlich vom Bodenwärmestrom profitieren kann, der nachts von wärmeren Bodentiefen zur kühleren Bodenoberfläche gerichtet ist. Eine mögliche Abgabe der

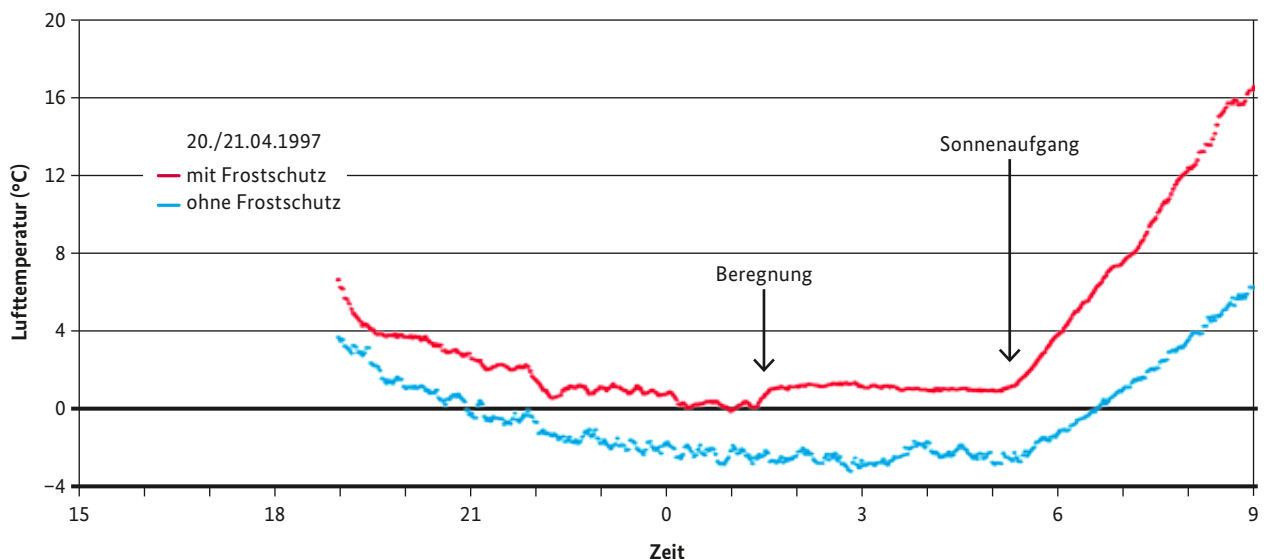
Bestandswärme an die freie Atmosphäre durch Windbewegung wird durch Folie oder Vlies weitgehend reduziert.

Schädigend könnten sich Folienulagen allerdings dann erweisen, wenn sie Temperaturen von deutlich unter  $0\text{ °C}$  annehmen und unmittelbar auf der Pflanze aufliegen. Um Pflanzenschäden zu vermeiden, ist es sinnvoll, die Abdeckung zu beregnen und die freiwerdende Gefrierwärme als Mittel gegen eine weitere Temperaturabsenkung zu nutzen. Beim Gefrierprozess wird eine Wärmemenge von ca.  $333\text{ kJ/kg}$  (Kilojoule pro Kilogramm) freigesetzt<sup>1</sup>, so dass kontinuierlich zugeführtes Wasser ein Absinken der Oberflächentemperatur unter den Gefrierpunkt von  $0\text{ °C}$  verhindert. Die Frostschutzberegnung ist deshalb die klassische Wahl der Frostabwehr, die nicht nur bei flachwüchsigen, sondern auch bei höherwüchsigen Kulturen, z.B. im Obstbau, angewandt wird (siehe Kapitel 6.7).

Die hohe Wärmeleitfähigkeit von Eis sorgt dafür, dass die Temperatur des gefrierenden Wassers ( $0\text{ °C}$ ) unmittelbar der beregneten Kunststoffauflage bzw. den Pflanzenteilen zugeführt wird. Wird die Beregnung unterbrochen und kein weiteres Beregnungswasser mehr nachgeliefert, erlischt die Frostschutzwirkung, und die Oberflächentemperatur sinkt auf die sog. Feuchttemperatur, die im Fall einer Frostwetterlage unter  $0\text{ °C}$  liegt.

Abb. 5.2.2a beschreibt die Wirkung des Frostschutzes innerhalb eines Frühkartoffelfeldes. Im Bestandsraum wurden Temperatursensoren einerseits unter Folie, andererseits im freien, ungeschützten Feldteil installiert. In der zweiten Nachthälfte wurde die Folie zusätzlich beregnet. Deutlich wird, dass die beregnete Folie den Frost abhält und gegenüber ungeschütztem Freilandanbau einen Wärmeverlust von  $2 - 5\text{ °C}$  verhindert.

Abb. 5.2.2a: Temperatur im Bestandsraum eines Frühkartoffelfeldes (Messort: Braunschweig, 20.-21.4.1997). Die Messungen erfolgten sowohl unter Folie (rote Kurve), die zeitweise zum Zweck des Frostschutzes beregnet wurde, als auch im benachbarten, ungeschützten Feldteil ohne Frostabwehr (blaue Kurve).



<sup>1</sup> Zum Vergleich: zum Erwärmen von 1 kg Wasser von  $0\text{ °C}$  auf  $100\text{ °C}$  wird eine Wärmemenge von ca.  $420\text{ kJ}$  benötigt.



Abb. 5.2.2b: Erdbeerfeld mit Stroheinlage (Foto: Hennings/ZAMF, 2015).

Neben Folien und Vlies werden häufig Strohaufagen zum Forstschutz verwendet. Strohaufagen sind allerdings nur sinnvoll, solange diese völlig die zu schützende Kultur abdecken. Bei Kulturen, bei denen das Stroh eher eine hygienische Wirkung entfalten soll, wie z.B. bei Erdbeeren, die vor spritzwasser- oder windgetragenen Sandeintrag durch eine Stroheinlage *unterhalb* des Blattkörpers geschützt werden sollen (siehe **Abb. 5.2.2b**), kann sich im Fall von Spätfrösten unmittelbar über der Strohschicht ein frostverstärkender Effekt zeigen (siehe Löpmeier et al., 2012; Köpcke, 2013). Der Grund ist, dass Lufteinschlüsse innerhalb des Strohvolumens den vom wärmeren Bodeninnern zur kalten Strohoberfläche gerichteten Wärmetransport unterbinden, was dem generellen Ziel eines Frostschutzes bzw. einer Ertragssicherung zuwiderläuft. Die Isolationseigenschaft des Strohs wirkt hier kontraproduktiv als zusätzliche Gefahrenquelle.

### 5.3 Wechselseitige Effekte von Windparks und Geländeklima

Die Anzahl von Windparks hat in den letzten Jahren infolge der Nachfrage nach regenerativer Energie enorm zugenommen. Windkraftanlagen werden in der Regel auf landwirtschaftlich genutzten Flächen errichtet, so dass die Frage auftritt, inwieweit ein Einfluss auf das Gelände- oder Bestandsklima nachweisbar ist. In Deutschland ist einer derartigen Fragestellung bisher kaum nachgegangen worden. Grund hierfür mag sein, dass eine belastbare Untersuchung eine Kontrollfläche als Vergleichsstandort erfordert, die

einerseits gleichen großräumigen Wetterbedingungen unterläge, wie z.B. einem zeitlich und mengenmäßig identischen Niederschlagseintrag. Und andererseits müsste sie bezüglich Größe und Beschaffenheit (d.h. Geländestruktur, Boden, Kultur und Kulturpflege, usw.) einer Kopie der Windparkfläche und deren Umgebung entsprechen. Aufgrund weitläufig angebaute Kulturen bieten sich deshalb die USA eher als Untersuchungsgebiet an.

#### 5.3.1 Auswirkungen von Windkraftanlagen auf das Geländeklima

In Felduntersuchungen und theoretischen Studien wurden in den USA Einflüsse der Windfarmen auf die Landoberflächentemperatur nachgewiesen, die aus der verstärkten vertikalen Durchmischung der bodennahen Atmosphäre durch die Rotorbewegung resultieren.

Nachts wird durch die Rotorblätter wärmere Luft aus höheren Schichten zum kühleren Boden transportiert, tagsüber dagegen kühlere Luft aus der Höhe zum wärmeren Boden. Diese Wärmetransporte führen dazu, dass nachts auch die windabgewandte Seite des Windparks (Lee) eine höhere bodennahe Lufttemperatur aufweist als die windzugewandte Seite (Luv), während tagsüber dagegen das Lee geringfügig kühler ist als das Luv (siehe Roy und Traitteur, 2010).

Zhou et al. (2012) werteten Satellitenmessungen der Monate Juni bis August eines mehrjährigen Zeitraums aus und fanden für die nächtliche Differenz der Landoberflächentempe-

ratur zwischen Windparkfläche und Umland einen positiven Temperaturtrend von  $+0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$  pro Dekade, während tagsüber der Trend negativ war und  $-0.04\text{ }^{\circ}\text{C}$  pro Dekade betrug. Hauptursache war die gestiegene Anzahl der installierten Turbinen von ca. 100 im Startjahr der Untersuchung 2003 auf ca. 2350 Windturbinen im Endjahr 2011.

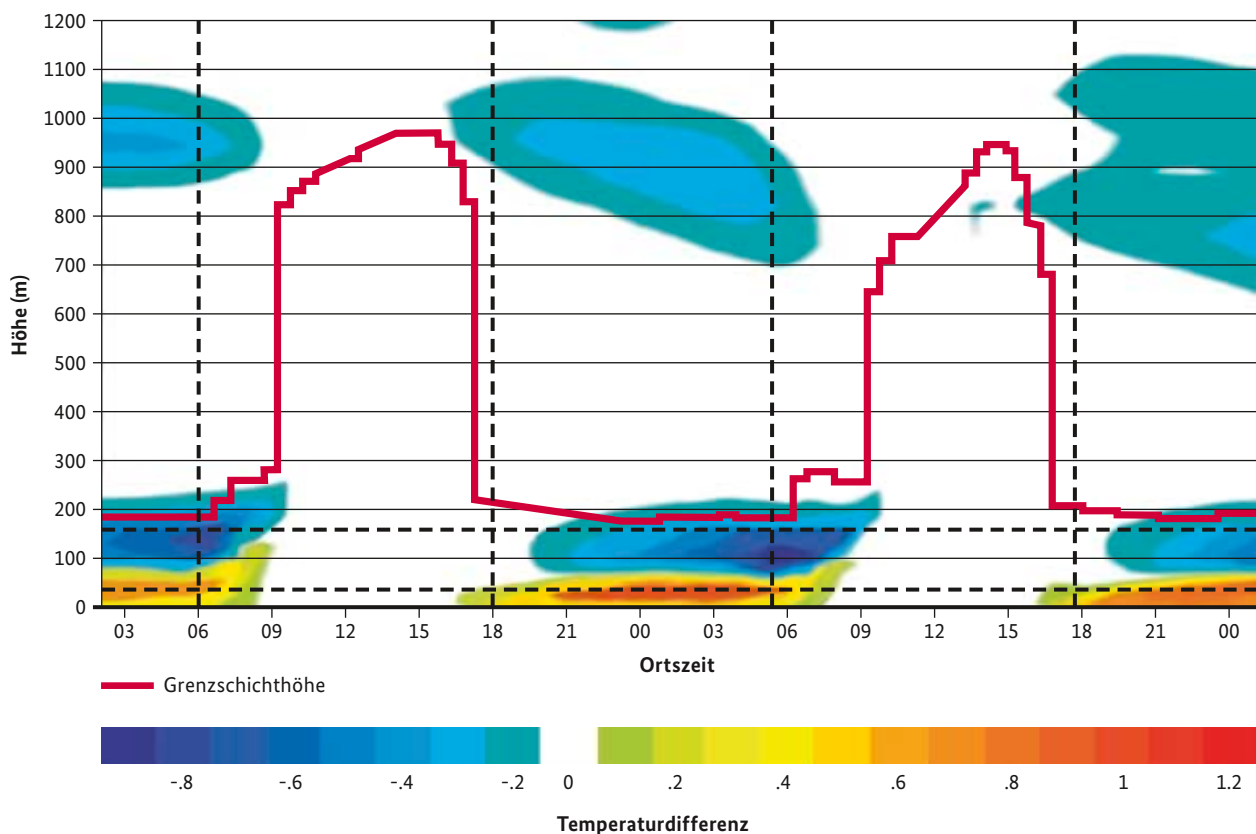
Einen weiteren Beleg liefern numerische Simulationen des Temperatur- und Windfeldes. Fitch et al. (2013) berechneten unter nächtlichen Bedingungen einen bodennahen Temperaturanstieg von  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  innerhalb eines fiktiven  $10 \times 10\text{ km}^2$  großen Windparks (Abb. 5.3.1) sowie eine bodennahe Windzunahme von  $0.4\text{ m s}^{-1}$  in 10 m Höhe (jeweils gegenüber Nichtfarm-Bedingungen). Aus der Kombination von nächtlicher Wind- und Temperaturerhöhung ließe sich folgern, dass z.B. Taubildungsraten und Benetzungsereignisse innerhalb eines Windparks schwächer ausfallen als im Umland. Darüber hinaus dürften Schäden durch Spätfröste seltener auftreten. Erinnerung sei daran, dass Windräder kleinerer Bauart in der Landwirtschaft ursprünglich zur Frostabwehr eingesetzt wurden.

### 5.3.2 Auswirkungen des Kulturpflanzenanbaus auf die Energieausbeute

Neuere Untersuchungen in den USA zeigen, dass landwirtschaftliche Flächen einen maßgeblichen Einfluss auf die Energieausbeute von Windkraftanlagen ausüben können. Gemäß einer Modellstudie von Vanderwende und Lundquist (2016) führt ein großflächiger Kulturwechsel von Mais zu Soja zu vertikalen Wind- und Turbulenzänderungen, die gestatten, dass dem Windfeld über Soja während des Monats mit dem höchsten Bestandshöhenunterschied (August) 14% mehr Energie entnommen werden kann als dem Windfeld über Mais.

Dieses Ergebnis veranlasste die Autoren zu der Feststellung, dass sich der Windenergieertrag in landwirtschaftlich genutzten Regionen durch kreatives und koordiniertes Bestandsmanagement erhöhen lässt. Ob und inwieweit sich in Deutschland für die Landwirtschaft die Möglichkeit bieten wird, Partner der Windenergiebranche zu werden, indem sie gezielt in Windparkregionen flachwüchsige Kulturen anbaut, bliebe weiterer Forschung sowie politischer Unterstützung vorbehalten.

**Abb. 5.3.1: Modellierter Temperaturdifferenz zwischen Windfarm und Nichtfarmbedingungen (nach Fitch et al., 2013, Fig.10a, bearbeitet). Die horizontalen Linien geben den Bereich der Rotorbewegung an (Nabenhöhe: 100 m, Rotordurchmesser: 126 m), die vertikalen Linien repräsentieren Sonnenaufgang und Sonnenuntergang. Die gelb-roten Flächen zeigen eine Erwärmung, die blauen Flächen eine Abkühlung an. Die rote Kurve kennzeichnet die Obergrenze der Durchmischungsschicht, deren Anstieg auf ca. 1000 m durch strahlungs- bzw. temperaturbedingte Turbulenzbildung gegen Sonnenaufgang einsetzt, und die gegen Sonnenuntergang infolge Turbulenzdämpfung auf ca. 200 m absinkt.**



## 5.4 Auswirkungen von Flüssen/Kanälen/Seen als potenzielle Wetterscheiden auf das regionale Klima

In Analogie zu dem bekannten Begriff *Wasserscheide*, der die Trennlinie benachbarter Flusseinzugsgebiete bezeichnet, hat sich im Sprachgebrauch der Ausdruck *Wetterscheide* eingebürgert. Als Wetterscheiden können z.B. Höhenzüge und Gebirge in Betracht kommen, die, sofern sie quer zur Kammlinie angeströmt werden, einen typischen regionalen Wettercharakter hervorrufen können. Bekannt sind z.B. zirkulationsbedingt unterschiedliche Niederschlagsverteilungen mit stärkeren Regenfällen im Luv und Aufhebungszonen bzw. Föhneffekten im Lee. Aber auch große Seen wie der Bodensee entwickeln ein typisches Regionalklima, zu dem die massive Wassermasse als Träger Wärmespeicher beiträgt. Hiervon profitiert der Kulturanbau auf den Bodenseeinseln, deren mildes, ausgeglichenes Klima nicht nur profitablen Gemüseanbau, sondern auch begrenzten Zitrusanbau und Palmenwuchs zulässt.

Häufig wird auch behauptet, dass Flüsse oder Kanäle markante Wetterscheiden darstellen. Untersuchungen hinsichtlich der Auswirkungen natürlicher oder künstlicher Flussläufe auf Wetter und Klima sind allerdings rar. Eine der wenigen Untersuchungen begleitete den Bau des Elbseitenkanals im östlichen Niedersachsen. Der Kanal weist eine Breite von ca. 53 m, eine Wassertiefe von etwas über 4 m und eine Dammhöhe von 10 - 23 m auf. Zweijährige Messungen wurden sowohl vor als auch nach dem Bau vorgenommen, um zu klären, inwieweit kleinklimatische bzw. agrarmeteorologische Folgewirkungen möglich seien (Beinhauer und Martens, 1980).

Zwar wurde festgestellt, dass gegenüber der fernerer Umgebung die nächtliche Luftfeuchte, Taubildung und Frostgefährdung in Kanalnähe aufgrund von Windruhe und etwas geringerer Minimumtemperatur leicht erhöht waren. Dennoch schloss die Untersuchung mit folgender Gesamteinschätzung: „Das Wasser des Kanals beeinflusst weder in den Einschnitten noch auf den Dämmen das Mikroklima des landwirtschaftlich genutzten Umlandes, da die Wasserfläche und damit auch die Menge zu gering ist, ...“. Leichte räumliche Änderungen der Messparameter wurden der Störung des Windfeldes durch den Damm zugeschrieben. Lediglich ab einer Dammhöhe von mehr als 20 m ließ sich der Einfluss des Kanalbaus auf die räumlich verteilten meteorologischen Messgrößen statistisch absichern.

## 5.5 Biologische Rückkopplungseffekte auf das Regionalklima

Es ist hinlänglich bekannt, dass Kulturanbau und Schaderregententwicklung von der atmosphärischen Umwelt abhängen. Interessant ist, dass beide sich rückkoppelnd auf das Klima auswirken können. Um zu ermitteln, in welcher Größenordnung diese Rückkopplungseffekte liegen und um einen

Nachweis im klimatologischen Maßstab (d.h. mit Daten herkömmlicher, grobmaschiger Stationsmessnetze) führen zu können, müssen die klimaändernden Verursacher sich über großräumige Gebiete erstrecken.

Ein Parameter, an dem die Stärke der Rückkopplung gemessen werden kann, ist z. B. die Lufttemperatur. Als Orientierung möge eine Temperaturänderung von 1 °C dienen, wobei man sich vergegenwärtigen sollte, dass die Lufttemperatur deutschlandweit in den letzten 100 Jahren aufgrund der Emission klimawirksamer Schadgase um eben 1 Grad (exakter: 1.4 °C seit 1881) gestiegen ist und bis 2050 vermutlich um ein weiteres Grad steigen wird. An drei Beispielen wird nachfolgend gezeigt, dass biologische bzw. landwirtschaftliche Veränderungen der Landoberfläche deutliche Klimaeffekte nach sich ziehen können.

### 5.5.1 Einfluss von Schaderregern

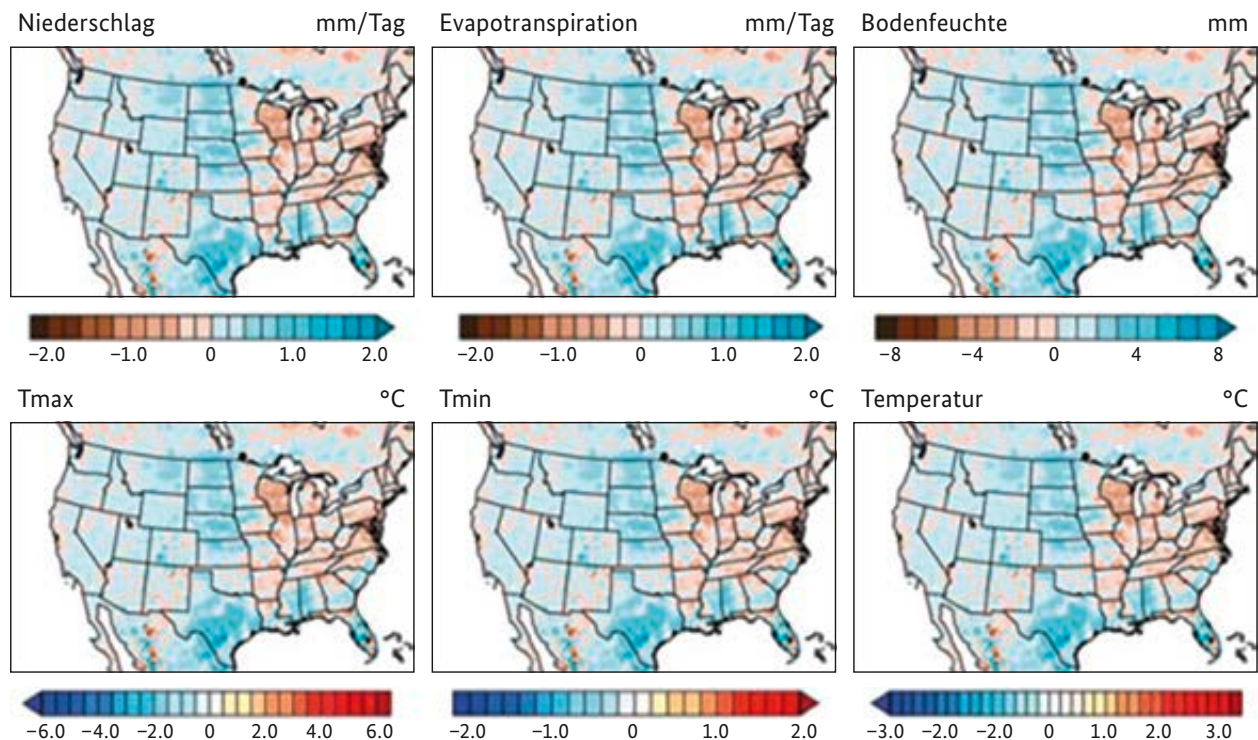
Im Rahmen der globalen Erwärmung verlagern sich Klimazonen, was zu Invasions- bzw. Migrationsbewegungen von Pflanzengesellschaften und Insektenpopulationen führt. Inzwischen lässt sich belegen, dass durch wandernde Schaderreger und klimatisch bedingte Populationsschübe Flächen befallen werden, deren Schädigung einen spürbaren Klimaeffekt hervorruft. Der Nachweis einer klimatologisch relevanten ökologischen Störung setzt allerdings voraus, dass die betroffenen Flächen groß genug sind, um eine entsprechende Wirkung zu entfalten. Eingang in die Fachliteratur fand z.B. die großflächige Schädigung von Waldgebieten durch den Borkenkäfer, der in der kanadischen Provinz British Columbia eine Fläche von ca. 170.000 km<sup>2</sup> befiel. Durch das Absterben der Bäume reduzierte sich deren sommerliche Verdunstungsleistung um 19 %, was im Gegenzug infolge der unveränderten Sonneneinstrahlung zu einer Erwärmung der betroffenen Landoberfläche um 1 °C führte (Maness et al., 2013).

### 5.5.2 Einfluss landwirtschaftlicher Landnutzungsänderungen

Weitläufige land- und forstwirtschaftliche Eingriffe in die „natürliche“ Vegetation, d.h. jene Vegetation, die sich aufgrund der Bodenverhältnisse und der klimatischen Situation in einer Region historisch etabliert hat und Teil des Systemgleichgewichts geworden ist, führen nachweisbar zu einem anthropogenen Klimasignal. In einer US-amerikanischen Modellstudie mit aktuellen und ehemals natürlichen Landbedeckungen wurde nachgewiesen, dass der Wechsel der vor der Besiedlung Nordamerikas anstehenden Gras- und Waldvegetation zu einer durch Ackerbau und Viehzucht geprägten Landschaftsform eine Abkühlung verursachte (Diffenbaugh, 2009).

Am stärksten ist dieser durch dominante Landnutzungswechsel und verändertes Bestandsmanagement hervorgerufene Effekt während der Vegetationsperiode ausgeprägt. Dieses „warm season cooling“ liegt bei einer Größenordnung

**Abb. 5.5.2: Reaktion meteorologischer Parameter auf veränderten Bewuchs.** Angegeben sind Differenzen, die sich aus dem Wechsel von der natürlichen zur aktuellen Vegetation ergeben. Das Simulationsergebnis repräsentiert den Zeitraum Juni bis August 1988 – 2002 (nach Diffenbaugh, 2009, Fig. 4, bearbeitet).



von  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$  und erstreckt sich überwiegend entlang der Great Plains und entlang des Mittleren Westens bis nach Texas (Abb. 5.5.2).

Ursächlich für den Abkühlungseffekt ist u.a. ein veränderter hydrologischer Zyklus, wobei regional verstärkte Niederschlagsprozesse zu einer erhöhten Bodenfeuchte und Verdunstung führen, die wiederum maßgeblich den Abkühlungsprozess verantworten.

Ein weiteres Beispiel für einen durch Landwirtschaft verursachten Effekt ist die mehrjährige Dürresituation im mittleren Westen der USA vor ca. 80 Jahren. Im Verlauf einer zunächst moderaten Trockenperiode, die Anfang der 1930er Jahre gemäß Modellsimulation durch einen La-Niña-Effekt und somit durch den Einfluss kühler pazifischer Wassertemperaturen ausgelöst wurde und sich eher auf den Süden der USA ausgewirkt hätte, kam es infolge anthropogenen Einwirkens zur Nordverlagerung der trockenen Luftmasse in die Kernregion der Great Plains und zu einer Erwärmung mit verheerenden Folgen (Cook et al., 2009). Grund war die Bodendegradation durch siedelnde Farmer, welche die klimatisch angepasste trockenresistente Grasvegetation des mittleren Westens durch dürr empfindlichen Weizen ersetzen. Die Trockenheit führte deshalb zur Vernichtung des landwirtschaftlichen Anbaus sowie zu Staubstürmen auf den zerstörten Flächen, weshalb das Extremereignis den Namen ‚Dust Bowl‘ erhielt. Die Anreicherung der Atmosphäre mit zusätzlichem Aerosol wirkte sich schließlich auf den Strahlungshaushalt und - als Folge - auf die Bildung eines

zentralen Hochdruckgebiets aus, welches zur Verschärfung der ursprünglich milden Dürre beitrug. Die Extremsituation zog schließlich die Aufgabe der Farmen nach sich und löste eine Migrationsbewegung der Bevölkerung in die weniger betroffenen Nachbarstaaten aus.

### 5.5.3 Einfluss durch Feldberegnung

Beregnungseinsätze finden spätestens dann statt, wenn durch ausbleibende Niederschläge Ertrags- und Qualitätseinbußen drohen. Nicht nur in Mitteleuropa, sondern auch in anderen Regionen der Erde nahmen beregnete Anbauflächen aufgrund des gestiegenen Nahrungsmittelbedarfs, der gewachsenen Ansprüche an die Ertragsqualität sowie aufgrund der erhöhten Verfügbarkeit der Beregnungstechnik im Laufe des letzten Jahrhunderts zu, und zwar mit einer deutlichen Forcierung in den Nachkriegsjahren ab 1945 (Abb. 5.5.3a). In Deutschland beträgt die heutige Beregnungsfläche ca. 3.3 % der landwirtschaftlichen Fläche (Sourell und Michel, 2014).

Um ihren Stoffwechsel solange wie möglich aufrecht zu erhalten, reduzieren die an Wassermangel leidenden - und daher beregnungsbedürftigen - Kulturen ihre Verdunstungsleistung bzw. den hierfür benötigten Energieaufwand, was bei gleichbleibendem Strahlungsangebot der Sonne zur Erwärmung der Bestände und der bestandsnahen Luft führt.

Abb. 5.5.3a: Zunahme der globalen Bewässerungsfläche in den Jahren 1900 bis 2008 (nach Siebert und Döll, 2011).

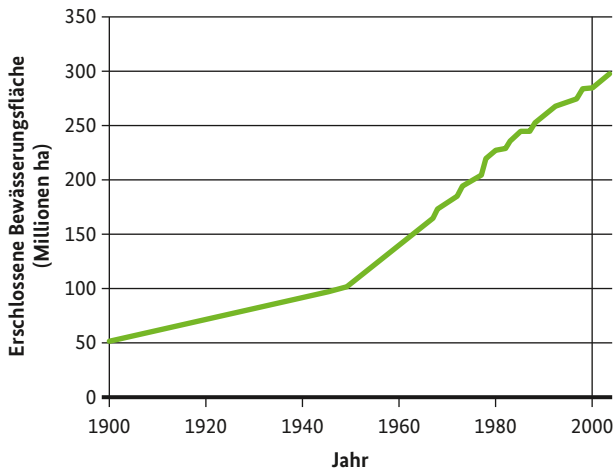
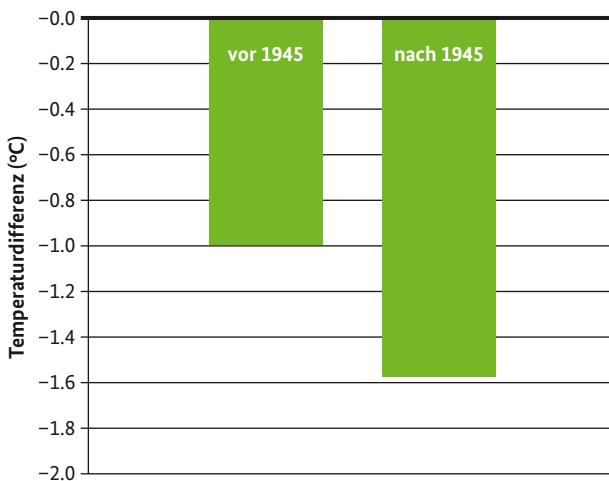


Abb. 5.5.3b: Differenz des mittleren Temperaturmaximums zwischen fünf Stationen innerhalb und fünf Stationen außerhalb von Beregnungsgebieten der Great Plains. Die Daten decken den Zeitraum 1906 - 1999 ab. Gemittelt wurde über die Vegetationsperioden (Mai - September) der Zeiträume „vor 1945“ bzw. „nach 1945“ (nach Mahmood et al., 2006, Fig. 6).



Dagegen können beregnete Bestände infolge der höheren Bodenfeuchte ihre Verdunstungsleistung erhöhen, kühlen aber im Gegenzug aufgrund des hierzu benötigten Energieaufwandes ab.

In Nebraska/USA konnte auf Basis des klimatologischen Messnetzes der Nachweis geführt werden, dass großflächige Beregnung zu einer Absenkung des nachmittäglichen Lufttemperaturmaximums um 1 - 2 °C während der Vegetationsperiode führt (Mahmood et al., 2006). Dabei zeigten sich deutliche Unterschiede zwischen den weniger intensiven Beregnungsmaßnahmen vor dem Jahr 1945 und den intensiveren Maßnahmen danach, wobei letztere eine deutlich stärkere Abkühlung nach sich zogen (Abb. 5.5.3b).

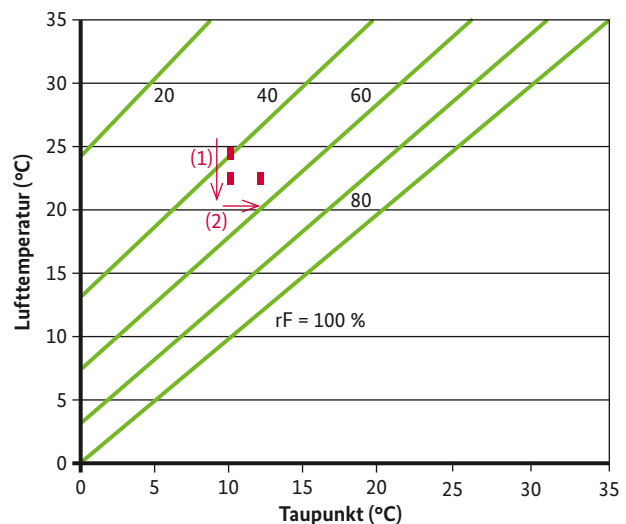
Um ebenfalls den Abkühlungseffekt zu quantifizieren, verglichen Lobell und Bonfils (2008) zeitliche Trends der täglichen Maximum- und Minimumtemperatur inner- und

außerhalb des kalifornischen Beregnungsgebietes. Die Datengrundlage entstammte den Monaten Juni bis August des Zeitraums 1934-2002. Innerhalb der bewässerten Region ließen sich deutlich negative Trends der Maximum- und Minimumtemperatur nachweisen ( $T_{\max}$ : -0.32 °C/Dekade,  $T_{\min}$ : -0.11 °C/Dekade), während außerhalb der Beregnungsgebiete - teils unter urbanem Einfluss - positive Trends auftraten ( $T_{\max}$ : 0.03 °C/Dekade,  $T_{\min}$ : 0.21 °C/Dekade). Auf den bewässerten Flächen erfolgte somit eine merkbliche Abkühlung, auf den bewässerungsfreien Flächen der Umgebung dagegen eine Erwärmung. Insofern maskiert großräumige Beregnung das Wärmesignal der durch Treibhausgase geprägten Klimaänderung (Diffenbaugh, 2009).

Nicht nur die Lufttemperatur, sondern auch die Luftfeuchte und die Komponenten der gesamten Wasserbilanz sind von der gestiegenen Beregnungsintensität betroffen, was sich ebenfalls durch eine US-amerikanische Studie belegen lässt. So versorgte das Grundwasser aus dem High Plains Aquifer (Nebraska, Great Plains) in den 1940er Jahren eine landwirtschaftliche Fläche von 7.500 km<sup>2</sup> mit Beregnungswasser. Bis in die 1980er Jahre vergrößerte sich die Beregnungsfläche auf mehr als 60.000 km<sup>2</sup>. Die Inanspruchnahme der Tiefenvorräte verdoppelte die jährliche Menge verdunstungsfähigen Wassers an der Oberfläche, was zu einer schwachen Anregung des lokalen natürlichen Niederschlagsprozesses führte. Aufgrund derartiger Auswirkungen wird in den USA die Beregnung als größte durch den Menschen induzierte hydrologische Störung bezeichnet (Moore und Rojstaczer, 2001).

Neben der Niederschlagszunahme wurde im Beregnungsgebiet Nebraskas auch der Nachweis eines Anstiegs des atmosphärischen Feuchtegehalts erbracht. Als Maß diente

Abb. 5.5.3c: Zusammenhang zwischen Lufttemperatur und Taupunkt bei konstanter relativer Luftfeuchte (Linien repräsentieren relative Feuchten von 20, 40, 60, 80 und 100 %). Die drei eingezeichneten Punkte zeigen als Beispiel, dass bei Erniedrigung der Lufttemperatur um 2 °C (von 25 auf 23 °C; Pfeil 1) und bei einer Taupunktzunahme von ebenfalls 2 °C (von 10 auf 12 °C, Pfeil 2) die relative Luftfeuchte von 40 % auf 50 % steigt (dargestellt durch den rechten Punkt zwischen der 40%- und 60%-Linie).





die sog. Taupunkttemperatur, d.h. diejenige Schwelle der Lufttemperatur, bei welcher der in der Luftmasse enthaltene Wasserdampf kondensieren würde.

Gegenüber dem nichtberegneten Umland stieg im Beregnungsgebiet der Taupunkt um ca. 1.5 °C an (Mittel über die Vegetationsperiode Mai-September; Mahmood et al., 2008), was mit einer tendenziellen Erhöhung der relativen Luftfeuchte verbunden ist.

Abb. 5.5.3c zeigt die Wirkung der Beregnung auf die Lufttemperatur, den Taupunkt und die relative Luftfeuchte. In der Regel liegt vor Beregnungsbeginn die Lufttemperatur deutlich oberhalb des Taupunktes, gleichbedeutend mit einer relativen Luftfeuchte weit unterhalb des Sättigungswertes von 100 % (z.B. 40 % bei einer angenommenen Lufttemperatur von 25 °C und einem Taupunkt von 10 °C).

Infolge großflächiger Beregnung sinkt die Lufttemperatur (1), gleichzeitig steigt der Taupunkt (2), so dass sich der Feuchtezustand der Luftmasse dem der Wasserdampfsättigung nähert, was sich in einem Anstieg der relativen Luftfeuchte äußert (siehe Pfeile in Abb. 5.5.3c).

## Literatur

Beinhauer, R., Martens, G.H., 1980. Kleinklimatische Geländeaufnahme zur agrarmeteorologischen Beweissicherung am Elbe-Seitenkanal. Amtliches Gutachten für die Wasser- und Schifffahrtsdirektion Mitte – Neubaugruppe Elbe-Seitenkanal. Deutscher Wetterdienst, Ahrensburg.

Berendonk, C., 2011. Weiden und Mähweiden. In: Lütke Entrup, N., Schäfer, B.C. (Hrsg.) Lehrbuch des Pflanzenbaus, Band 2: Kulturpflanzen, AgroConcept, Bonn, 3. Aufl., 790-830.

Braden, H., 2005. Calculation of microclimate under plastic mulches using an extended version of the SVAT model AM-BETI. Meteorol. Z., 14, 165-172.

Cook, B.I., Miller, R.L., Seager, R., 2009. Amplification of the North American "Dust Bowl" drought through human-induced land degradation. PNAS, 106, 4997-5001.

Diffenbaugh, N.S., 2009. Influence of modern land cover on the climate of the United States. Clim. Dyn., 33, 945-958.

Fitch, A.C., Lundquist, J.K., Olson, J.B., 2013. Mesoscale influences of wind farms throughout a diurnal cycle. Mon. Wea. Rev., 141, 2173-2198.

Geiger, R., 1961. Das Klima der bodennahen Luftschicht - Ein Lehrbuch der Mikroklimatologie. Springer.

Köpcke, D., 2013. Frostschutz bei Erdbeeren. Mitt. OVR, 68 (2), 44-47.

Lobell, D.B., Bonfils, C., 2008. The effect of irrigation on regional temperatures: a spatial and temporal analysis in California, 1934-2002. J. Climate, 2063-2071.

Löpmeier, F.-J., Wittich, K.-P., Frühauf, C., Schittenhelm, S., 2012. Entwicklungen und Stand der Aktivitäten in der Agrarmeteorologie, Promet, 38 (Nr. 1/2), Deutscher Wetterdienst, Offenbach.

Mahmood, R., Foster, S.A., Keeling, T., Hubbard, K.G., Carlson, C., Leeper, R., 2006. Impacts of irrigation on 20th century temperature in the northern Great Plains. Global and Planetary Change, 54, 1-18.

Mahmood, R., Hubbard, K.G., Leeper, R., Foster, S.A., 2008. Increase in near-surface atmospheric moisture content due to land use changes: evidence from the observed dewpoint temperature data. Mon. Wea. Rev., 136, 1554-1561.

Maness, H., Kushner, P.J., Fung, I., 2013. Summertime climate response to mountain pine beetle disturbance in British Columbia. Nature Geoscience, 6, 65-70.

Moore, N., Rojstaczer, S., 2001. Irrigation-induced rainfall and the Great Plains. J. Appl. Meteorol., 40, 1297-1309.

Roy, S.B., Traiteur, J.J., 2010. Impacts of wind farms on surface air temperatures. PNAS, 107, 17899-17904.

Schnelle, F. (Hrsg.), 1965. Frostschutz im Pflanzenbau. Bayerischer Landwirtschaftsverlag.

Siebert, S., Döll, P., 2011. Bewässerungswassernutzung – eine globale Perspektive. In: J.L. Lozán, H. Grassl, P. Hupfer, L. Karbe, C.-D. Schönwiese (Hrsg.): Warnsignal Klima: Genug Wasser für alle? 3. Auflage, 173-178.

Sourell, H., Michel, R., 2014. Bewässerung in einer Zeit des Wandels. In: R. Michel, H. Sourell (Hrsg.): Bewässerung in der Landwirtschaft. Agrimedia, 7-14.

Vanderwende, B., Lundquist, J.K., 2016. Could crop height affect the wind resource at agriculturally productive wind farm sites? Boundary-Layer Meteorol., 158, 409-428.

Zhou, L., Tian, Y., Roy, S.B., Thorncroft, C., Bosart, L.F., Hu, Y., 2012. Impacts of wind farms on land surface temperature. Nature Climate Change, 2, 539-543.



## 6 Agrarmeteorologische Modelle und Verfahren in der Anwendung

Die drei agrarmeteorologischen Kompartimente Atmosphäre, Boden und Pflanze beeinflussen sich gegenseitig über zahlreiche Wechselwirkungen. Dabei findet der Austausch von Energie, Stoffen und Impuls statt. Ein Beispiel hierfür ist z. B. die Verdunstung in Form der Evaporation (Abgabe von Wasser vom Boden direkt in die Atmosphäre) und der Transpiration (Aufnahme des Wassers durch die Pflanze aus dem Boden, Transport in der Pflanze und Abgabe an die Atmosphäre). Eine Pflanzendecke wiederum wirkt isolierend und sorgt dafür, dass die Bodentemperaturen gedämpft werden. Die Tag-Nacht-Schwankungen der Bodentemperatur sind dann gering. So liegen die Temperaturen unter einer Grasnarbe am Tag um bis zu 15 K unter der Temperatur einer benachbarten unbewachsenen Fläche (Häckel, 1999). Dicht wachsende und noch nicht gemähte Feldfutter- und Grünlandbestände gelten als sogenannte Kaltluftbildner. Der Nachschub der Bodenwärme in die Atmosphäre wird nachts durch die dichte Pflanzendecke einschränken. Die Pflanzenoberfläche kühlt besonders stark ab und kann so zur Bildung sogenannten Strahlungsnebels führen. Im unteren Bereich des Bestandes sinkt die Temperatur nicht so stark ab. Die Tag/Nacht-Schwankung der Temperatur direkt über dichten Beständen ist besonders groß.

All diese Effekte haben einen Einfluss auf die Entwicklung von Pflanzen, pilzlichen und tierischen Schaderregern und auf das umgebende Mikro- und Bestandesklima. Die meteorologischen Bedingungen schränken gleichzeitig die Anwendung von Pflanzenschutzmitteln ein. Gemäß § 3 des Pflanzenschutzgesetzes (PflSchG) darf Pflanzenschutz nur nach guter fachlicher Praxis durchgeführt werden. Dazu gehört, dass die Grundsätze des integrierten Pflanzenschutzes und der Schutz des Grundwassers berücksichtigt werden. Pflanzenschutzmittelanwendungen sind bei dauerhaften Windgeschwindigkeiten über 5 m/s, Temperaturen über 25 °C

oder relativen Luftfeuchten unter 30 % zu vermeiden. Im Interesse einer gleichmäßigen Quer- und Längsverteilung sowie einer abdriftarmen Applikation, ist eine Fahrgeschwindigkeit bis zu 8 km/h zu wählen, da bei höheren Fahrgeschwindigkeiten die Verteilungsprobleme überproportional zunehmen. Zudem können bei Nichtbeachtung erhebliche Mittelverluste durch Abdrift und Verflüchtigung auftreten.

Der DWD berechnet in einem AMBER-Teilmodell die Abdrift von Pflanzenschutzmitteln und gibt deren Verluste beim Ausbringen in Prozent an. Mit einem weiteren Modell wird ein Index berechnet, der die Bedingungen für die Anwendung von Kontakt- und Wuchsstoffherbiziden zwischen „besonders ungünstig“ und „günstig“ beschreibt. Für die Bewertung werden die meteorologischen Größen relative Luftfeuchte, Niederschlag, Temperatur, Sonneneinstrahlung und Windgeschwindigkeit verwendet. Besonders wichtig ist es den Anwendungszeitpunkt zu optimieren. Vor der Anwendung von Herbiziden sollte es möglichst regnerisch, bedeckt und wüchsig sein. Bei der Ausbringung der Herbizide sind eine Luftfeuchtigkeit von mehr als 70 %, bedeckter Himmel, geringe Windgeschwindigkeit und Tagesmitteltemperaturen von mehr als 5 °C ideal. Nachfolgend sollte kein Frost auftreten. Hohe Luftfeuchtigkeit, bedeckter Himmel und für eine gewisse Zeit kein Niederschlag sind günstig.

Im folgenden Kapitel soll auf wichtige Kulturpflanzen im Bereich der Landwirtschaft und des Gemüse-, Obst- und Weinbaus eingegangen werden, wobei die wichtigsten, in der Beratung eingesetzten Modelle vorgestellt werden. Der Einsatz von agrarmeteorologischen Modellen variiert sehr stark zwischen den verschiedenen Kulturpflanzen. Vor allem im Bereich der Sonderkulturen ist eine Vielzahl von Modellen entstanden.

## 6.1 Getreide

Autoren: Harald Maier, Cathleen Frühauf, Werner Buchner, Stephan Brand

Getreide gehört zu den ältesten Kulturpflanzen. Bereits 8000 v.Chr. wurden die Unterarten des Weizens Einkorn und Emmer und die Gattung Gerste angebaut. Ihre züchterische Bearbeitung war relativ einfach, da die Gattungen Selbstbefruchter sind. Größte Bedeutung in Deutschland haben die Gattungen Weizen (*Triticum*), Gerste (*Hordeum*), Roggen (*Secale*) und Hafer (*Avena*) (Abb. 6.1.1). Alle heutigen Getreidesorten gehören zur Familie der Süßgräser. Zu Ihnen gehören, neben den bereits genannten, noch Mais, Reis und Hirse. In der agrarmeteorologischen Beratung des DWD kommt den Getreidearten Weizen (*Triticum aestivum*) und Gerste (*Hordeum vulgare*) die größte Bedeutung zu. Ihr prozentualer Anteil an der gesamten Getreidefläche Deutschlands (ohne Mais) beträgt 83,7 % (FAO, 2013).

Wachstum, Entwicklung und letztlich die Ertragsbildung hängen von den Umweltfaktoren Boden und Klima ab. Die Maßnahmen der Bestandesführung, insbesondere Bodenbearbeitung, Düngung und der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln, angepasst an die einzelnen Getreidesorten, bauen darauf auf. Diese Einflussgrößen entscheiden maßgeblich über die Art und das Ausmaß der Umsetzung des genetischen Ertragspotentials einer Kulturpflanze. Abbildung 6.1.2 fasst am Wachstum und Ertrag beteiligten Faktoren zusammen.

Klima, Witterung und Wetter sind verantwortlich für die Wachstumsbedingungen der oberirdischen Pflanzenteile und des je nach Kultur, Bodenart und Wasserverhältnissen sowie Gefügestandes unterschiedlich ausgeprägten Wurzelsystems. Das Klima entscheidet maßgeblich über die Anbaufähigkeit und -würdigkeit einer Kulturpflanze. Der Boden ist gewissermaßen das Fundament. Er übernimmt wichtige Speicheraufgaben (Wasser, Nährstoffe, Wärme, organische Substanz mit allen pflanzlichen und tierischen Stoffen und deren Umwandlungsprodukte) (Scheffer und Schachtschabel, 1998).

Die lebenden Organismen (das aus Bodenflora und -fauna bestehende Edaphon sowie die lebenden Wurzeln) zählen nicht zur organischen Substanz des Bodens, übernehmen aber ebenfalls wichtige Speicherfunktionen. Der Boden gleicht ungünstige atmosphärische Zustände (Dürre etc.) aus, gibt den Pflanzenwurzeln halt und beeinflusst die Wachstumsbedingungen der Wurzeln entscheidend. Die Kombination aus Klima und Boden bestimmt – im Einklang mit allen zur guten landwirtschaftlichen Praxis gehörenden Maßnahmen der Düngung, des Pflanzenschutzes, der Sortenwahl und der Bodenbearbeitung sowie Fruchtfolgegestaltung – weitgehend den am Standort zu erreichenden Ertrag (Boden-Klima-Räume, vgl. Kap. 2.4 und Abb. 2.4.2).

Die einzelnen Pflanzen bzw. ihre Halme konkurrieren untereinander um die Ressourcen Licht, Luft, Wasser und Nährstoffe. Daneben besteht eine Konkurrenz zwischen den Kulturpflanzen und Unkräutern sowie Ungräsern, die



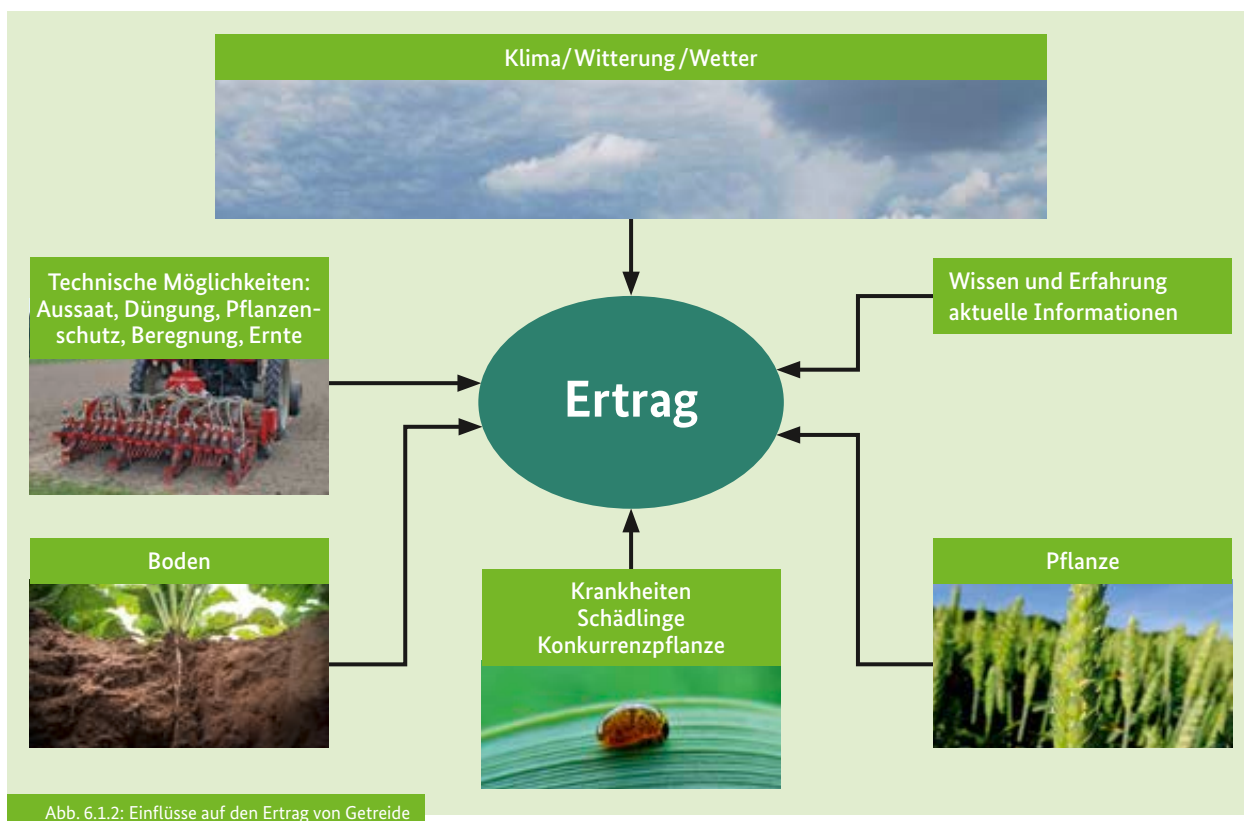


Abb. 6.1.2: Einflüsse auf den Ertrag von Getreide

Ertragsverluste erzeugen können. Auch Krankheiten und Schädlinge können ab dem Überschreiten einer Schadschwelle Ertragsreduzierung bewirken.

Der Landwirt versucht durch seine Tätigkeit, das Ertragspotential in Abhängigkeit von den Arten- und Sorteneigenschaften, den Witterungsbedingungen und den Maßnahmen Düngung, Pflanzenschutz und Bodenbearbeitung sowie der Fruchtfolgegestaltung auszuschöpfen. Über langfristige Maßnahmen, wie die Wahl des Bodenbearbeitungssystems oder der Fruchtfolge kann er die ober- und unterirdischen Umgebungsbedingungen der Pflanze, unter möglichst weitgehender Ressourcenschonung, nachhaltig beeinflussen und die Verwundbarkeit des Agroökosystems gegenüber Wetterextremen und Pflanzenkrankheiten verringern. Einen entscheidenden Einfluss auf die Ertragsbildung hat darüber hinaus die Bestandesführung, also alle kurzfristigen Maßnahmen, wie z. B. die Beregnung.

### 6.1.1 Phänologische Entwicklung

Die produktionstechnischen Maßnahmen im Ackerbau, wie Düngung, Krankheits- und Schädlingsbekämpfung richten sich nach der vegetativen und generativen (fruchtbildenden) Entwicklung der Getreidebestände. Zur Beschreibung der Entwicklungsphasen wurde in den 1990er Jahren die BBCH-Skala, ein Dezimal-Code, eingeführt. Sie hat sich aus der FEEKES- und ZADOKS-Skala entwickelt und gilt

mittlerweile als internationaler Standard (Witzenberger et al., 1989; Lancashire et al., 1991). BBCH ist eine Abkürzung für **B**iologische Bundesanstalt, **B**undessortenamt, **C**hemische Industrie. Die grobe Einteilung der Entwicklung erfolgt über so genannte Makrostadien. Der Bestand befindet sich in einem bestimmten Stadium, sobald 50 Prozent der Pflanzen dieses Stadium erreicht haben. Die Makrostadien werden in Mikrostadien unterteilt. Die erste Stelle der Kennnummer steht für das Makrostadium und die zweite Stelle für das Mikrostadium. Tabelle 6.1.1 zeigt die BBCH-Skala für Getreide.

Der DWD verfügt über ein phänologisches Messnetz aus ca. 1200 Beobachtungsstellen, an denen wichtige Phasen von Getreidearten/-sorten kontinuierlich erhoben werden. Die phänologischen Phasen dienen unter anderem als Eingangsgrößen in agrarmeteorologischen Modellen und somit der Beratung der Landwirte.

### 6.1.2 Standortansprüche

Umweltfaktoren lassen sich in Boden- und Klimafaktoren unterscheiden (Oehmichen, 1986). Sie sind Grundlage für produktionstechnische Entscheidungen. Der Anbauer achtet dabei auf einen optimalen Standort für die Einzelpflanze innerhalb des Bestandes. Ihr sollen ausreichend Licht, Wärme, Wasser, Luft und Nährstoffe zur Verfügung stehen. Diese Ressourcen beeinflussen über die Ertragsstrukturkomponenten den Ertrag (Abb. 6.1.3).

Tab. 6.1.1: Die BBCH-Skala für Getreide (Strauß et al., 1994)

Code des Makrostadiums	Beschreibung	Mikrostadien-Bandbreite
0	Keimung	von 00 trockener Samen bis 09 Auflaufen
1	Blattentwicklung	von 10 Blatt spitzt bis max. 19 neun Laubblätter entfaltet; ab 13 kann bereits ein Bestockungstrieb sichtbar werden; dann befindet sich das Getreide in Stadium 21
2	Bestockung	von 21 erster Bestockungstrieb sichtbar bis 29 neun Bestockungstriebe und mehr sichtbar. Sobald das Schossen einsetzt befindet sich das Getreide in Stadium 30
3	Schossen Haupttrieb	30: Haupt- und Bestockungstriebe richten sich auf und beginnen sich zu strecken; Basis des Vegetationskegels entfernt sich vom Bestockungsknoten 31: 1-Knotenstadium; Basis des Vegetationskegels mindestens 1 cm vom Bestockungsknoten entfernt 32: 2-Knotenstadium; Abstand zwischen ersten und zweiten Knoten mindestens 2 cm. 33 bis 34: dritter bzw. vierter Knoten mindestens 2 cm vom 2. bzw. 3. Knoten entfernt. 37: Fahnenblatt (= letztes, oberstes Blatt) spitzt 39: Ligula (Blatthäutchen) des Fahnenblattes sichtbar
4	Ähren- bzw. Rispschwellen	von 41 Verlängerung der Blattscheide des Fahnenblattes bis 49 Grannenspitzen
5	Ähren- bzw. Rispschieben	von 51 Austritt der Ähre/Rispe bis 59 Ähre/Rispe voll sichtbar
6	Blüte	von 61 Beginn der Blüte bis 69 Ende der Blüte
7	Fruchtbildung	71: Karyopse hat die halbe endgültige Größe erreicht 73: frühe Milchreife 75: Milchreife 77: späte Milchreife
8	Samenreife	83: frühe Teigreife 85: Teigreife 87: Gelbreife 89: Vollreife
9	Absterben	92: Totreife 97: Pflanzen völlig abgestorben

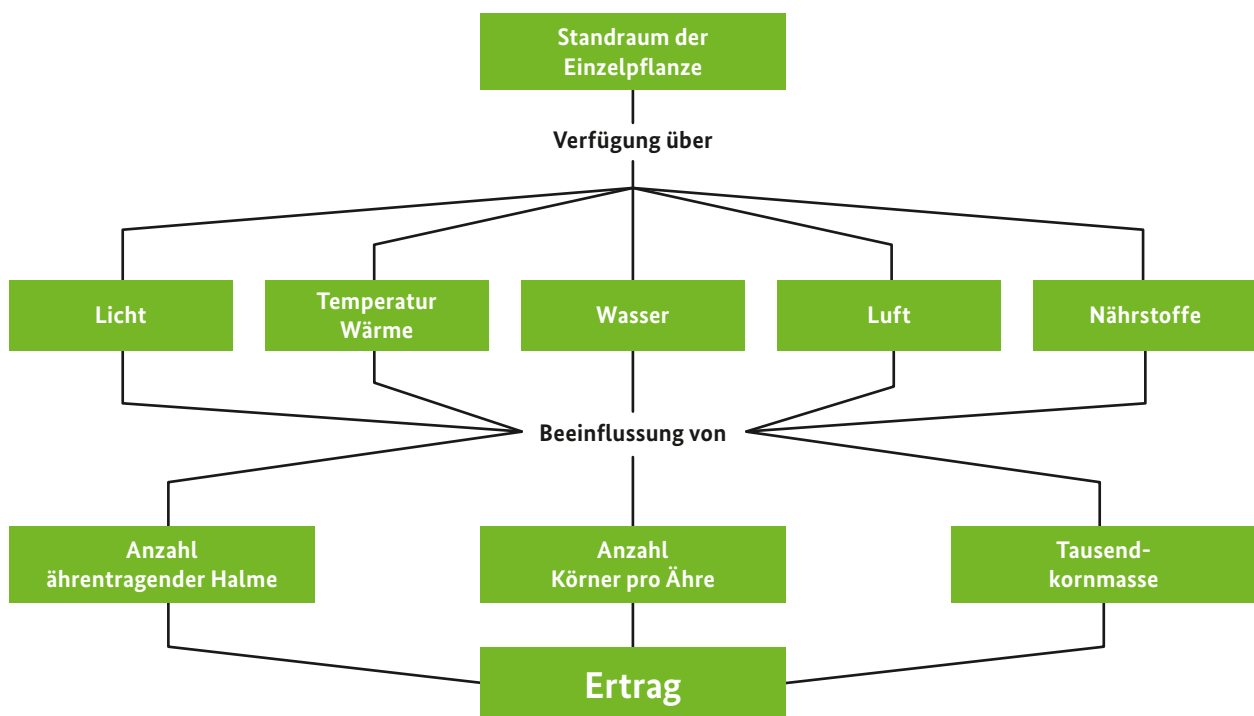


Abb. 6.1.3: Einwirkung der Umwelt auf die Einzelpflanze (nach Oehmichen, 1986; verändert)

Tab. 6.1.2: Vernalisationsbedarf von Getreide (nach Schönberger et al., 2006)

	Vernalisationsbedarf von Wintergetreide			
	Winterweizen	Wintergerste	Roggen	Triticale
Temperatur in °C	0 bis 3	0 bis 3	0 bis 3	0 bis 3
Dauer in Tagen	40 bis 70	25 bis 30	25 bis 30	27 bis 30

### Licht

Licht ist in unseren Breiten für Getreide ausreichend vorhanden, da nur ca. 56 % der einfallenden Strahlung vom Photosynthesystem genutzt werden können. Die Strahlungsnutzungseffizienz, der prozentuale Anteil der Strahlung, der von den Pflanzen durch die Photosynthese in Form chemischer Energie gespeichert wird, ist jedoch viel geringer. Er beträgt für Nutzpflanzen gemäßiger Breiten ca. 0,6 % (Begon et al., 1991).

Getreide, außer Mais, gehört zu den Langtagspflanzen, d. h. unter Kurztagsbedingungen findet nur vegetatives Wachstum statt. Erst ab einer Überschreitung der hellen Tageslänge (Photoperiode) von mehr als 13 bis 14 Stunden setzt generatives Wachstum ein. Äußerlich ist dies daran zu erkennen, dass das Getreide zu schossen beginnt (Streckungsphase). Gleichzeitig schiebt sich die embryonale Ähre nach oben. Sowohl Getreidearten, als auch deren verschiedene Sorten reagieren unterschiedlich auf die Tageslänge. Bei Winterungen hängt der Beginn der generativen Phase von der Vernalisation ab (s. u.).

Die Lichtintensität spielt vor allem im Zusammenhang mit der Bestandesarchitektur, insbesondere mit dem Blattflächenindex (LAI – leaf area index), eine Rolle. Er bezeichnet das Verhältnis zwischen assimilierender Blattoberfläche (in m<sup>2</sup>) pro 1 m<sup>2</sup> Erdoberfläche und ist dimensionslos (Oehmichen, 1986). Erst ab einem Blattflächenindex von 4 erreicht der Wirkungsgrad bzw. die Strahlungsnutzungseffizienz den höchsten Wert. Der maximale LAI-Wert (um 8) wird zum Ende der Schossphase (BBCH 39) erreicht und ist bereits zum Ährenschieben etwa auf die Hälfte reduziert. Die während der Kornfüllungsphase erforderlichen Assimilate werden zu etwa 40 % von den obersten Blättern und zusätzlich aus den Reserven des Halmes und der Assimilation der Ähre geliefert. Deshalb ist es wichtig, diesen obersten Bereich des Pflanzenbestandes gesund und frei von Schädlingen zu halten (top agrar, 2012).

### Temperatur und Wärme

Die Temperatur steuert viele Abläufe in den Getreidepflanzen. Sie beeinflusst sowohl das Spross- als auch das Wurzelwachstum. Produktives Wachstum findet erst ab einer Mindesttemperatur statt. Während die Keimtemperaturen von Getreide bei 2 bis 3 °C liegen, werden für das beginnende Sprosswachstum zwischen 3 °C bei Winterroggen und 6 °C bei Winterhafer und den Sommergetreidearten benötigt (siehe auch Tab. 6.1.3). Die Temperatur ist für den Abbau der Keimruhe, den Keimungsbeginn, die Vernalisation und die Differenzierung generativer Strukturen (Entwicklung der Ährenanlagen) verantwortlich (Aufhammer, 1998).

Hohe Lufttemperaturen beschleunigen die phänologische Entwicklung, so dass die Entwicklungsphasen des Getreides schneller durchlaufen werden. Für die Beschreibung der Entwicklung lassen sich deshalb Temperatursummen (Aufsummierung der Tagesmitteltemperaturen über einer Basistemperatur, siehe Kapitel 4.1.2) bilden. Für die Entwicklung eines Blattes vom Spitzens bis zur vollständigen Entfaltung der Blattspreite benötigt Sommergetreide 70 bis 80 und Wintergetreide 80 bis 100 Gradtage. Bei einer beschleunigten Entwicklung steht dem Getreide weniger Zeit für die Ausbildung von Ertragsorganen zur Verfügung. Dies gilt auch für die Entwicklung der Blütenstände (Halse und Weir, 1970), die aber neben der Temperatur auch von der Lichtintensität, der Tageslänge und Dauer der Vernalisation beeinflusst wird. Hohe Lufttemperaturen von 35 °C und mehr können Getreide schädigen. Die Blattoberflächentemperatur kann dann, je nach Wasserversorgung (Verdunstungskälte), bei 40 °C oder höher liegen. Während der Blüte reicht bereits eine kurze Phase von 30 bis 35 Minuten mit Temperaturen von 35 °C aus, um die Blütenmortalität bzw. Sterilität deutlich zu erhöhen.

Wintergetreide benötigt einen Kältereiz (Vernalisation), um generative Organe (Ähre oder Rispe) auszubilden. Die Vernalisation findet im Temperaturbereich von ca. -2 bis +5 °C statt und ist eine Voraussetzung dafür, dass ab einer bestimmten Tageslänge Blüten gebildet werden. Dadurch wird auch verhindert, dass bei einer Aussaat im Herbst und noch hohen Luft- und Bodentemperaturen eine unzeitgemäße Vorwinterentwicklung stattfindet, die durch nachfolgende Kälteeinwirkungen zu Schaden kommt. Ohne diesen Kältereiz werden bei einigen Sorten auch keine Blüten angelegt oder die Blütenanlage erfolgt verspätet. Der Beginn der Schossphase verzögert sich oder unterbleibt sogar. Umgekehrt kann eine zu intensive Vernalisation die Bestockungsphase verkürzen bzw. die Schossphase verfrühen, was zu geringen Bestandesdichten führen kann. Das Vernalisationsbedürfnis unterscheidet sich nach Art und Sorte. Winterroggen benötigt z. B. eine stärkere Vernalisation als Winterweizen, während für Sommergetreide dagegen keine Vernalisation notwendig ist. Hier steuert in erster Linie die Tageslänge den Beginn des generativen Wachstums. Für die Getreidearten geben Schönberger et al. (2006) folgende Werte an (Tab. 6.1.2).

Für Weizen liegt der optimale Temperaturbereich für den maximalen Trockenmassezuwachs, für den Ertrag und die Einzelkornmasse (bestimmt aus der Tausendkornmasse) bei 15 bis 22 °C. Maximale Eiweiß- und Glutengehalte werden erst bei Temperatur der Umgebungsluft von 20 bis 25 °C erreicht (Hay und Delécolle, 1989).

Niedrige Temperaturen werden von im Herbst ausgesäten Getreide gut vertragen. Für Winterweizen beträgt die Frostresistenz  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Aufhammer, 1989). Sommergetreide wird bereits bei geringeren Minustemperaturen geschädigt. Wie bei anderen Pflanzenarten, so spielt auch beim Getreide die Geschwindigkeit der Temperaturänderung eine Rolle. Ein langsamer Rückgang der Temperatur über mehrere Tage ermöglicht den Pflanzen sich über physiologische Prozesse anzupassen. Schnelle, starke Temperaturänderungen führen regelmäßig zu Schäden. Wie schnell und wie gut die Abhärtung erfolgt, ist dabei aber art- und sortenspezifisch. Hafer ist am frostempfindlichsten, gefolgt von Gerste, Weizen und Roggen. Die Frostresistenz hängt außerdem vom Entwicklungsstadium ab. Zum Zeitpunkt des Ährenschiebens und der Blüte nimmt sie deutlich ab (Doorenbos und Kassam, 1979). Durch eine angemessene, auf die Bodenart abgestimmte Kalidüngung wird die Frostresistenz und damit die Winterfestigkeit ebenfalls erhöht (Kalium reguliert den Wasserhaushalt und damit den osmotischen Druck in der Pflanzenzelle).

Besondere Bedeutung haben:

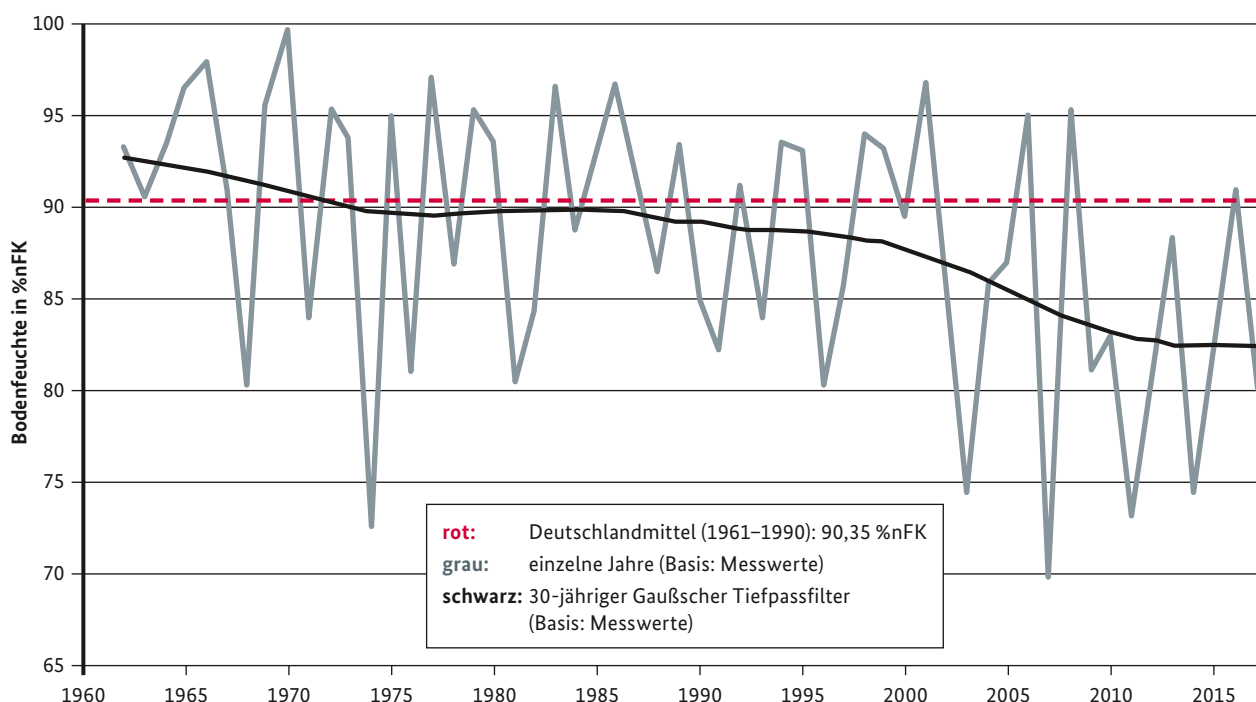
- die Wurzelzerreißung durch Bodenbewegung in Folge von Wechselfrost (Volumenänderung durch Gefrieren und Auftauen des enthaltenen Wassers) und
- die Frosttrocknis (Bei starker Sonneneinstrahlung, Wind und noch gefrorenem Boden, verlieren die Pflanzen durch Transpiration Wasser, sind aber gleichzeitig nicht in der Lage, Wasser und Nährstoffe aus dem Boden aufzunehmen.).

### Wasser

Im Gegensatz zu Licht und Temperatur benötigt die Pflanze das Wasser als Stoffkomponente. Für die Photosynthese sind allerdings nur 1 % des aufgenommenen Wassers erforderlich. Der weitaus größere Teil wird durch die Transpiration an die Atmosphäre abgegeben. Wasser übernimmt darüber hinaus viele weitere Funktionen. Es ist essentiell für die Keimung von Saatgut und für Stoffwechselprozesse. In Wechselwirkung mit der Umgebung wird das Öffnen und Schließen der Spaltöffnungen (Stomata) reguliert. Dies beeinflusst die Transpiration und den Gasaustausch (Aufnahme von  $\text{CO}_2$  und die Abgabe von Wasser und Sauerstoff). Eine Ertragsmaximierung verlangt einen optimalen Gasaustausch und somit geöffnete Stomata. Dies ist nur bei ausreichender Wasserversorgung möglich. Umgekehrt bleiben die Stomata bei ungenügender Wasserzufuhr weitgehend geschlossen und schränken damit die Stoffbildung der Pflanze ein. Dies kann zum Erschlaffen des Blattapparates und zur irreversiblen Schädigung des Pflanzengewebes führen (Welketracht).

Der Boden speichert Wasser, das den Pflanzen zu einem großen Teil zur Verfügung steht (nutzbare Feldkapazität) (siehe Kapitel 3.2). Im Frühjahr ist die Bodenfeuchte im Keimhorizont, aber auch der ungestörte Wassernachschub aus der Krume und dem Unterboden maßgeblich für das Gelingen des Keimungsprozesses. Fallen nach der Aussaat über einen längeren Zeitraum (in der Regel 1 - 2 Wochen; abhängig von der Wasserhaltefähigkeit der Bodenart) keine Niederschläge, kann dies zu einem ungleichmäßigen Auflaufen der Kulturpflanzen führen. Hält die Trockenheit weiter an, stockt das Pflanzenwachstum, da die ausgebrachten Dünger durch das fehlende Wasser nicht gelöst werden und somit nicht pflanzenverfügbar sind.

**Abb. 6.1.4: berechnete Bodenfeuchte (Schicht 0-60 cm) für Wintergetreide auf einem leichter Boden, Monat April, 1962-2017, rot: Deutschlandmittel; grau: einzelne Jahre, schwarz: geglättete Kurve; Modell: AMBAV**



Bei Wassermangel leidet vornehmlich das Pflanzenorgan, das gerade ausgebildet wird. So werden in der Phase des Schossens z. B. die Fahnenblätter gebildet, die für die Photosynthese sehr wichtigen sind. Sind sie zu klein, leidet in der späteren Kornausbildungsphase die Stärkeeinlagerung und somit das als Qualitätsmerkmal wichtige Tausendkorngewicht. Zuviel Feuchtigkeit hingegen fördert das Ausbreiten von Krankheiten und kann zu Luft- und damit auch Sauerstoffmangel im Boden führen.

In den letzten Jahren wurde die Frühjahrs- bzw. Frühsommertrockenheit häufiger beobachtet (Abb. 6.1.4). Seit 2003 ist eine Häufung von Jahren mit besonders trockenen Bedingungen im Frühjahr zu beobachten. Diese beginnen bereits im Monat März und setzen sich bis in den Frühsommer fort. Diese geringeren Bodenfeuchte-Werte treten somit in der Hauptwachstumszeit vieler Kulturpflanzen auf, in der eine stetige Wasserversorgung Voraussetzung für eine optimale Ertragsbildung ist.

#### Luft

Die Zusammensetzung und die Eigenschaften der Luft, die die Pflanze umgibt, beeinflussen Wachstum und Entwicklung entscheidend. Der Kohlendioxidgehalt fördert das Wachstum direkt, denn Getreide kann, als sogenannte C3-Pflanze, den für die Photosynthese wichtigen Kohlenstoff nicht vorkonzentrieren. Je mehr Kohlenstoff zur Verfügung steht, desto größer ist damit die Photosyntheserate. Schadstoffe, wie z. B. Ozon, schädigen dagegen, wie andere Pflanzen, auch das Getreide. Der Feuchtegehalt der Atmosphäre und der Wind haben einen Einfluss auf die Verdunstung und den Nährstofftransport in der Pflanze (Wasserpotentialgefälle). Tabelle 6.1.3 gibt einen Überblick über die Ansprüche von Getreide. Es handelt sich dabei, insbesondere im Hinblick auf Vegetationsdauer und Transpirationskoeffizient, um mittlere

Werte. Letzterer schwankt um ca.  $\pm 100$  um den Mittelwert und kann vor allem über die Sortenwahl und Bestandesdichte beeinflusst werden. Voraussetzung ist jedoch gleichzeitig eine ausreichende Nährstoffversorgung (Düngung) und gesunde Pflanzen (Pflanzenschutz).

#### 6.1.3 Ertrag

Der Ertrag von Getreide setzt sich aus folgenden Strukturkomponenten zusammen:

- Anzahl der Ähren pro Quadratmeter (Bestandesdichte)
- Anzahl der Körner pro Ähre
- Tausendkornmasse

Die Ertragsstrukturkomponenten werden in unterschiedlichen Entwicklungsphasen angelegt und ausgebildet. Der Landwirt versucht auf der Grundlage einer gezielten Sortenwahl, deren Anlage und Ausbildung in ausgewogener Weise und angepasst an die Standortbedingungen (Boden, Witterung, Wasserverfügbarkeit) zu fördern.

Für die Bestandesdichte sind die sortentypische Reaktion, Saatstärke, Saatzeitpunkt, Aussaattiefe, Witterung und die in mehreren Teilgaben auszubringende Stickstoffdüngung maßgeblich, sofern Schaderreger (Brachfliege, Mäuse etc.) den Bestand nicht dezimieren. In zu dichten Beständen erfolgt der Energieaustausch mit der Atmosphäre im obersten Bereich, je nach Entwicklungsstadium an den obersten Blättern oder der Ähre. Bei Windstille sind hier der größte Tagesgang der Temperatur und die stärkste Taubildung zu finden, da die Strahlung nicht in den Bestand eindringen kann. Die höher gelegenen Blattschichten absorbieren zudem die photosynthetisch aktive Strahlung weitestgehend. Je

Tab. 6.1.3: Ansprüche kohlenhydratreicher Körnerfruchtarten an ausgewählten Standort- und Umweltfaktoren (Größenordnung) (nach Aufhammer, 1998)

Faktoren	Winterweizen	Winterroggen	Wintertriticale	Wintergerste	Winterhafer	Sommerweizen	Sommerroggen	Sommergerste	Sommerhafer
<b>Vegetationsdauer (Tage)</b> Zeitraum Aussaat bis Reife	300	290	290	300	300	160	130	120	130
<b>Temperatur (°C)</b>									
• Mindestkeimtemp.	3	2	3	3	4	2	2	2	4
• Frostresistenz <sup>1)</sup> bis Mindestwachstumtemp. <sup>2)</sup>	-20 5	-25 3	-20 4	-15 5	-10 6	-5 6	-5 5	-4 6	-8 6
<b>Wasser</b>									
• Transpirationskoeffizient <sup>3)</sup>	500	400	450	450	570	500	400	450	570
• Nutzungsgrad <sup>4)</sup> gespeicherter Winterfeuchte	+	+	+	++	++	+	+	±	±
• Empfindlichkeit <sup>4)</sup> gegenüber Sommertrockenheit	+	±	±	-	±	++	+	+	++
<b>Boden</b>									
• Eignung für leichte sandige Böden <sup>4)</sup>	-	+	±	-	±	-	+	±	±
• Eignung für schwere tonreiche Böde <sup>4)</sup>	±	-	±	±	±	±	-	±	+
• Optimaler pH-Wert	~7,0	~5,5	~6,0	~7,0	~6,0	~7,0	~5,5	~7,0	~6,0

<sup>1)</sup> ohne Schneedecke <sup>2)</sup> Trockenmasse <sup>3)</sup> Wasser je kg produzierte Trockenmasse <sup>4)</sup> ++ sehr hoch, + hoch, ± mittel, - gering



**Tab. 6.1.4: Zielbestandsdichten und Beährungskoeffizient für Winterweizen (LWK, 2015)**

	Zielbestandsdichten (Ähren/m <sup>2</sup> )	Beährungskoeffizient (ährentragende Halme je Pflanze)
Lößstandorte	580	2,4
Lehmstandorte	520	1,9
Sandstandorte	550	1,8
Höhenlagen	580	1,9

dünnere Bestände, desto größer ist der oberste Bereich, der am Energieaustausch und an der Photosynthese teilnehmen kann. Das in diesem Bereich auftretende Temperaturmaximum hängt außerdem von der Verdunstung bzw. der Wasserversorgung ab.

Zu hohe Bestandesdichten führen bereits in frühen Entwicklungsphasen zu einem unproduktiven Wasserverbrauch. Für Winterweizen gelten als anzustrebende Zielbestandsdichten und Beährungskoeffizient die in Tabelle 6.1.4 angegebenen Werte.

Reichlich mit Nährstoffen versorgte und dadurch vergleichsweise stark entwickelte Pflanzenbestände sind häufig die Ursache für Wasserknappheit in späteren Entwicklungsphasen, insbesondere auf Standorten mit geringem Wasserangebot und/oder geringer Wasserspeicherfähigkeit. Spätere Ertragsstrukturkomponenten werden dann nicht optimal ausgebildet, so dass die Anzahl der Körner oder das Tausendkorngewicht geringer ausfallen. Die Bestandesdichte hat einen großen Einfluss auf das Bestandesklima. Dichte Pflanzenbestände trocknen langsamer ab. Die länger andauernde Feuchtigkeit im Bestand fördert zahlreiche Pilze, wie *Septoria tritici*, *Erysiphe graminis* (Echter Mehltau) im Weizen oder *Drechslera teres* (Netzflecken) in Gerste. Zu niedrige Bestandesdichten vermindern ebenfalls den Ertrag durch eine zu geringe endgültige Anzahl von ährentragenden Halmen pro Quadratmeter.

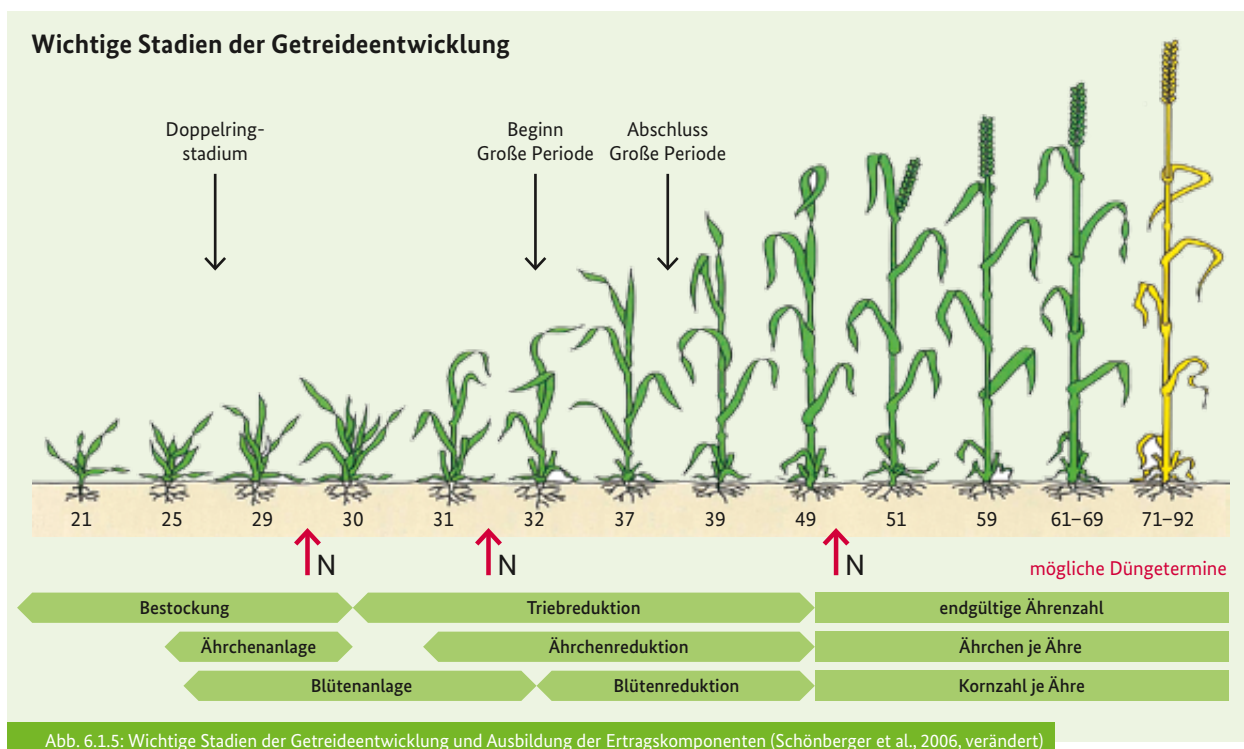
Getreidearten und -sorten zeichnen sich durch unterschiedliche Bestockungsfreudigkeit aus. Der Saatzeitpunkt entscheidet bei Winterungen über die mögliche Herbstentwicklung. Wintergerste sollte z. B. in der letzten Septemberdekade gedrillt werden, damit sie sich im Herbst noch ausreichend bestocken kann. Idealerweise erreicht sie vor dem Winter das Mikro Stadium BBCH 29 (siehe Tab. 6.1.1). Winterweizen verfügt dagegen über ein großes Aussaatfenster von Anfang Oktober bis Mitte November. Sie erreicht im Herbst höchstens BBCH 21 bis 23. Je später der Saatzeitpunkt, umso dichter sollte ausgesät werden. Extrem spät gesäter Novemberweizen erreicht selten die Erträge von Oktoberweizen. Neben der unzureichenden Herbstentwicklung sind oft die zu hohen Bodenfeuchten und die teilweise verdichteten Böden dafür verantwortlich. Sie führen zu Staunässe und behindern das Wurzelwachstum. Die Saattiefe liegt idealerweise bei 2 bis 3 cm. Bei zu tiefer Kornablage leidet ebenfalls die Bestockungsfähigkeit. Vor allem Roggen muss flach gesät werden.

Kühle Temperaturen während der Bestockungsphase geben dem Getreide viel Zeit für die Anlage neuer Triebe. Die Anlage der maximal zur Verfügung stehenden Triebe ist in der Regel spätestens in BBCH 31/32 abgeschlossen. Es werden stets mehr Triebe angelegt als letztlich Ähren tragen. Der Beährungskoeffizient (siehe Tab. 6.1.4) gibt die Anzahl ährentragender Halme pro Pflanze an. Die Bestandsdichte wird von der Saatstärke, der Keimfähigkeit des Saatgutes, dem Feldaufgang, den Überwinterungsverlusten und dem vorgenannten Beährungskoeffizienten bestimmt. Die Zielbestandsdichten sind standort- und sortenabhängig und betragen im Mittel für Hafer, Triticale, mehrzeiliger Gerste 400 bis 500, für Winterweizen 450 bis 700, für Sommergerste 750 bis 800, für zweizeilige Wintergerste 800 bis 1100 ährentragenden Halmen (bzw. Rispen) pro Quadratmeter.

Die Anzahl der Körner pro Ähre entwickelt sich über einen langen Entwicklungsabschnitt, vom Schossbeginn bis zur Abreife. Bereits mit dem Schossbeginn wird mit dem embryonalen Stadium des spitzenständigen Ährchens die Anzahl der Spindelstufen pro Ähre festgelegt. Während der Halmstreckung, dem Schossen, entwickeln sich an den Spindelstufen die Blütenorgane. Wasser-, Nährstoff- oder Lichtmangel während des Schossens führen nicht nur zu kleineren Blättern, sondern beeinflussen auch die Blütenentwicklung und letztlich die Anzahl der Körner pro Ähre. Am Ende der Schossphase sind die Blüten voll ausgebildet. Bereits beim Austreten der Ähre aus dem Halm lässt sich die Anzahl der mit Ährchen belegten Spindelstufen feststellen. Ist ein Mangel während der Schossphase aufgetreten, sind im unteren oder oberen Bereich der Ähre eine oder mehrere Spindelstufen nicht besetzt.

Die Tausendkorngewichte werden im Anschluss an die Blüte, in der Kornfüllungsphase, ausgebildet. Die Bestandesdichte und die Anzahl der Körner pro Ähre stehen dann im Wesentlichen fest. Die vegetative Masse ist voll entwickelt und stellt ihr Wachstum ein. Die maximale Kornmasse ist stark genetisch determiniert. Milde Temperaturen und eine ausreichende Wasser- und Nährstoffversorgung ermöglichen eine lange Kornfüllungsphase und letztlich eine hohe Tausendkorngewichte. Ungünstige Bedingungen (Hitze, Trockenheit, Nährstoffmangel, Krankheiten, Lager etc.) ab der Blüte beeinträchtigen die Kornausbildung, so dass viele Körner sehr klein bleiben und deshalb vom Mähdröschler nicht erfasst werden. Die Tausendkorngewichte schwanken zwischen 35 und knapp 60 Gramm.

An die hohe Variabilität der atmosphärischen Bedingungen, wie sie in Deutschland üblich ist, ist das Getreide grundsätzlich gut angepasst. Der Ertragsaufbau erfolgt über einen längeren Zeitraum und gibt den Pflanzen die Möglichkeit, die schwächere Ausbildung einer früher angelegten Ertragsstrukturkomponente durch eine bessere Ausbildung einer späteren auszugleichen (Abb. 6.1.5). Allerdings gilt das nur für die Anlage der Anzahl der Halme pro Quadratmeter und die Kornzahl pro Ähre. Ungünstige Bedingungen, wie Wassermangel oder Hitze während der Kornfüllungsphase wirken sich unmittelbar auf die Ertragshöhe aus.



#### 6.1.4 Qualitätseigenschaften des Erntegutes

Die Qualität des Erntegutes, die auch nachhaltig von den Sorteneigenschaften beeinflusst werden kann, wird bewertet nach: Kornfeuchte, Fallzahl, Eiweißgehalt, Hektolitergewicht, Sedimentationswert, Backfähigkeit und Mahlfähigkeit.

##### Kornfeuchte

Während der Reife verringert sich der Wassergehalt im Korn. Als Kornfeuchte wird die Menge an Wasser (in Prozent) bezeichnet, die sich in einem Getreidekorn befindet. Die Getreideernte erfolgt, wenn die Kornfeuchte weniger als 16 % beträgt. Bei diesen Werten ist eine gute Lagerfähigkeit des Getreides gewährleistet. Muss die Ernte wegen schlechten Wetters bei einer höheren Kornfeuchte erfolgen, ist eine kostenaufwendige Nachtrocknung notwendig.

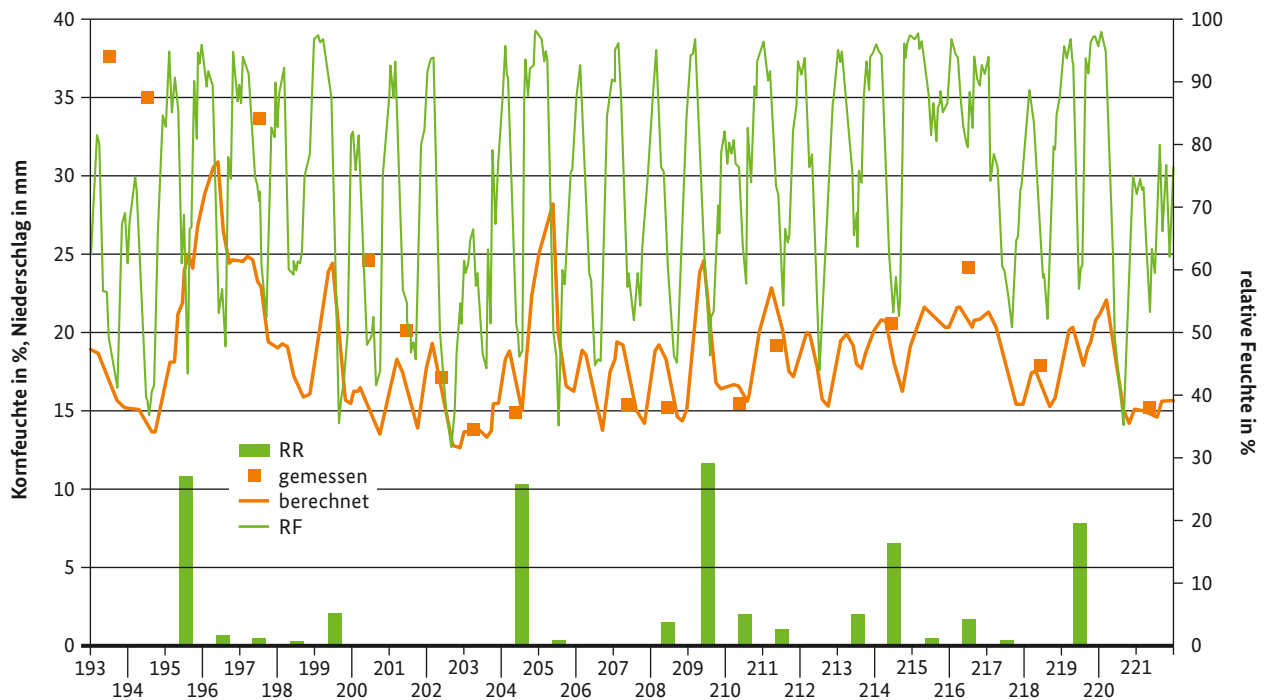
Grundlage zur Berechnung der Kornfeuchte ist ein Modell von Heger (1973), das geringfügig modifiziert wurde. Das Modell berechnet die Kornfeuchte nach dem phänologischen Stadium Gelbreife. Feuchtigkeit nimmt das reifende Korn durch Niederschlag und Tau auf. Da das Korn hygroskopisch ist, stellt sich zusätzlich ein Gleichgewichtszustand mit der relativen Feuchte der Umgebungsluft ein. Je nach herrschender relativer Feuchte trocknet das Korn ab oder es wird wieder angefeuchtet. Während der Erntezeit wird das Modell zur Vorhersage der Kornfeuchte eingesetzt. Die berechneten Werte liegen zwischen 36 % (mittlere Feuchte im Korn zum Termin Gelbreife) und 10 %. Geringere Werte werden aufgrund der typischen klimatologischen Verhältnisse in Deutschland nicht erreicht. Durch die starke Abhängigkeit

von der relativen Feuchte ergeben sich tagesperiodische Schwankungen der Kornfeuchte (Abb. 6.1.6). Der Vergleich der Kornfeuchtemessungen für das Jahr 2016 mit den Modellberechnungen für Winterroggen zeigt etwa ab dem 20. Juli eine sehr gute Übereinstimmung. Die ersten Testmessungen nach der Gelbreife ergeben sehr hohe Werte. Zu diesem Zeitpunkt ist das Korn noch sehr feucht und lässt sich nur schwer mahlen. Das Modell startet bereits mit dem Termin Gelbreife, jedoch wird die Kornfeuchte zu diesem frühen Zeitpunkt noch deutlich unterschätzt. Abbildung 6.1.7 zeigt Fotos des Winterroggenbestandes aus dem Zeitraum der Kornfeuchtemessungen.

##### Fallzahl bei Weizen

Die Fallzahl ist ein Qualitätsmerkmal von Brotgetreide, sie kann auch als Verkleisterungsfähigkeit oder Maß für die Stärkebeschaffenheit bezeichnet werden. Witterungseinflüsse während der Vegetationsperiode, besonders während der Abreife (ab BBCH 61), beeinflussen über die Enzymaktivität den Stärkegehalt des Getreidekorns und damit letztlich auch die Backqualität des Brotgetreides. Vor allem die Enzyme Amylase und Protease fördern unter feuchten Witterungsverhältnissen den Keimvorgang im Korn, sodass Stärke und Eiweiß, vor dem Erreichen des gewünschten Erntezustandes, im Korn abgebaut werden. Dadurch verschlechtert sich das Backverhalten. Die Wasseraufnahmefähigkeit des Mehles sinkt und das Backwerk ist weniger elastisch und wirkt klitschig. Vor allem bei Weizen- und Roggenmehlen ist der Auswuchs, erkennbar an Blatt- oder Wurzelkeimen am Getreidekorn, sehr gefürchtet und setzt eine vorausschauende, auf die Witterung abgestimmte Planung des Erntevorganges voraus. Durch die Züchtung stehen Sorten mit einer geringeren Neigung zu Auswuchs zur Verfügung. Aber auch

Abb. 6.1.6: Vergleich zwischen gemessener und berechneter Kornfeuchte von Winterroggen, Zeitraum 12.07.-10.08.2016 (Jahrestag 193-222), Gelbreife am 09.07.2016, Braunschweig.



eine leistungsstarke Erntetechnik kann dazu beitragen, dass in Ernteabschnitten mit trockener Witterung schneller und gezielter geerntet werden kann und damit der Einfluss unbeständigeren Wetters deutlich gemindert wird.

Zum Analysenverfahren:

Die Fallzahl gibt den Zeitraum an, den ein Rührviskosimeter für das Zurücklegen einer bestimmten Strecke innerhalb einer heißen Wasser-Mehl-Suspension benötigt (Abb. 6.1.8). Um Abweichungen zu vermeiden, sollte das Vermahlen der Körner immer nur mit derselben Mühle bzw. demselben Mühlentyp erfolgen. Der Messbereich der Fallzahl liegt zwischen 62 s und ca. 500 s. Optimale Werte für Weizenbackmehl werden bei 240 und 280 s erreicht. Liegt die Fallzahl nicht im optimalen Bereich, treten Volumen- bzw. Dichteänderungen auf (Abb. 6.1.9). Bei zu niedrigen Werten ist die Teigdehnbarkeit und Teigstabilität beeinträchtigt und es kommt zu Hohlraumbildungen.

Die Enzymaktivität im Korn steigt ab der frühen Milchreife (Weizen) bzw. Wasserreife (Roggen) an, erreicht etwa zur Gelbreife ihr Maximum, um anschließend eine kurze sortenabhängige Enzymruhe (Dormanz) zu durchlaufen. Zu hohe Enzymaktivität im Weizen- oder Roggenkorn ab der physiologischen Gelbreife verdirbt die Backqualität des Mehls, erkennbar an geringen Fallzahlen. Auswuchsgeschädigter Weizen z. B. hat eine schlechte Teigausbeute, liefert feuchte Teige und kleine Gebäcke mit einer harten, unelastischen Krume. Die Enzymaktivität wiederum ist stark vom Wassergehalt des Korns abhängig. Bei feuchtem Wetter und bei starkem Temperaturrückgang kann die Fallzahl steil abfallen. Eine langsame trockene Abreife mit hohen Temperaturen wirkt sich positiv auf die Fallzahl aus.



Abb. 6.1.8: Gerät zur Fallzahlbestimmung, Foto: F. Falke, DWD-ZAMF

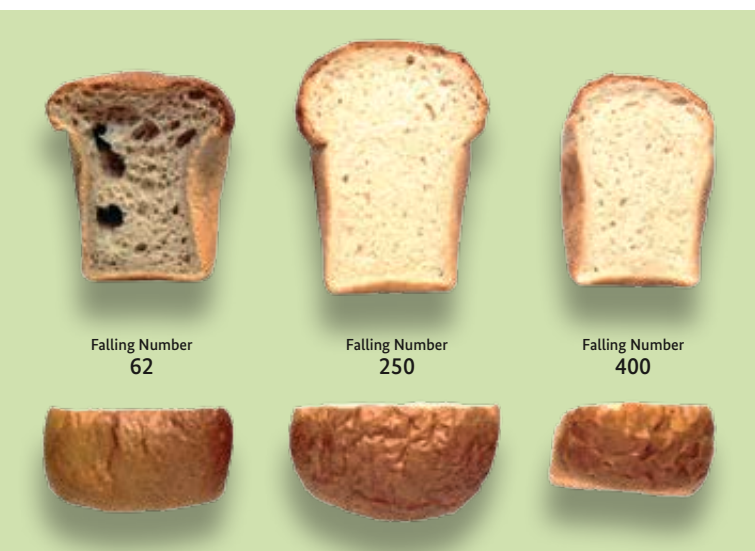


Abb. 6.1.9: Backergebnisse aus Mehlen gleicher Menge, aber mit stark unterschiedlicher Fallzahl (Quelle: Perten Instruments GmbH)

In der beschreibenden Sortenliste des Bundessortenamtes werden die Qualitätsmerkmale Fallzahl und Fallzahlstabilität mit Ausprägungsstufen charakterisiert, so dass je nach Standort und Verwertungsrichtung eine gezieltere Sortenwahl auch bezüglich dieses Kriteriums vorgenommen werden kann. Geht das Getreide durch starke Winde, Niederschlag oder zu massige Bestände ins Lager oder herrschen vor und während der Ernte feuchte Bedingungen, kann dies die Fallzahl stark beeinflussen. Die Fallzahlstabilität beschreibt die Fähigkeit einer Sorte auch unter diesen ungünstigen Bedingungen nicht auszuwachsen und die gewünschte Fallzahl zu halten. Wird ein bestimmter Grenzwert unterschritten, ist die betroffene Partie nicht mehr als Qualitätsgetreide – z. B. bei Weizen zu vermarkten – sondern muss als Futterweizen deklariert werden.

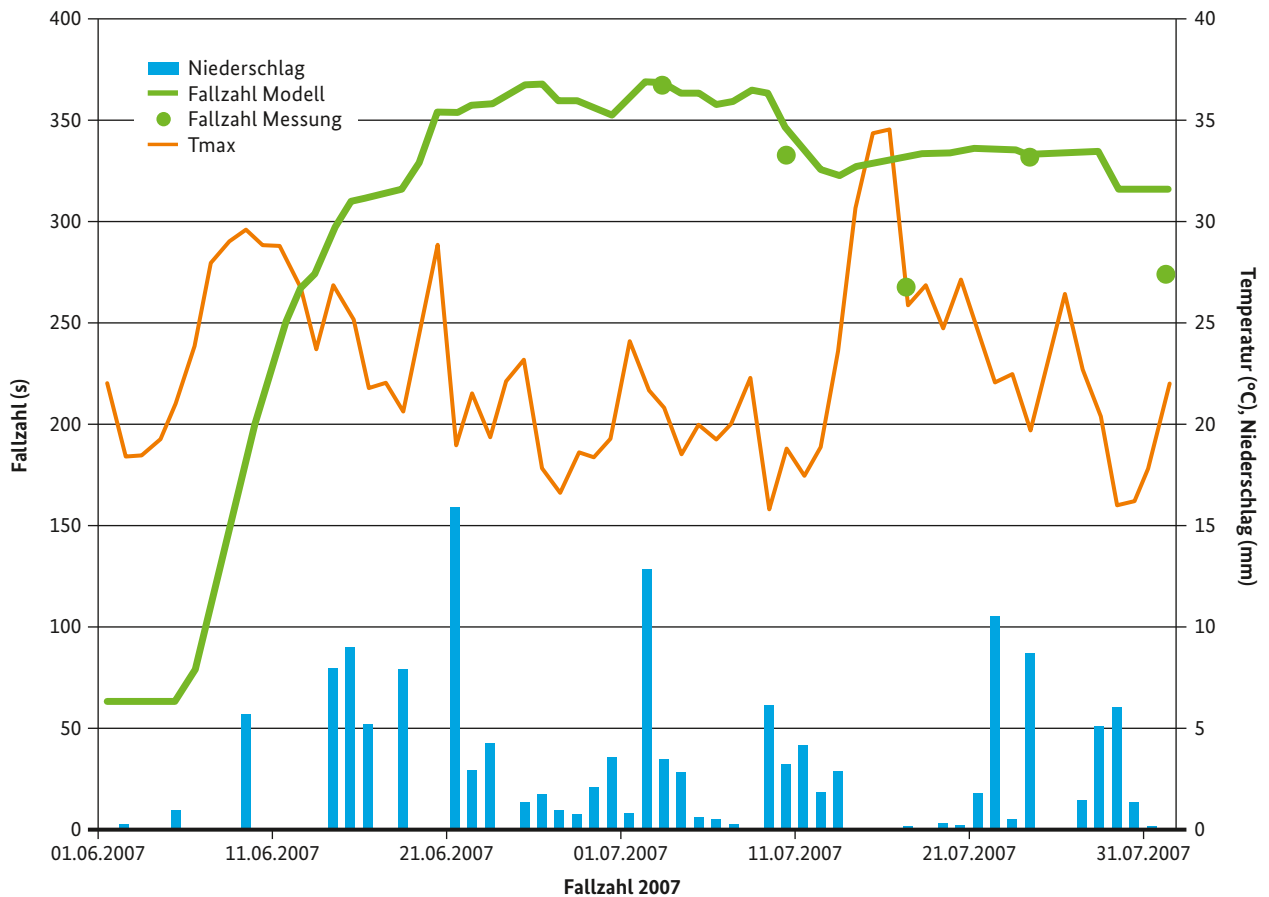
Ein AMBER-Teilmodell berechnet die Fallzahl („Backqualität Getreide“ unter [http://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/ku\\_beratung/landwirtschaft/agrarmodelle/agrarmeteorologische\\_modelle.html](http://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/ku_beratung/landwirtschaft/agrarmodelle/agrarmeteorologische_modelle.html)) und dient damit als Planungshilfe zur Bestimmung des optimalen Erntetermins, um eine hohe Getreidequalität zu gewährleisten. Mit dem phänologischen Stadium „Beginn des Ährenschiebens“ startet die Berechnung. Die Fallzahlentwicklung wird im Modell getrennt für Winterweizen, Sommerweizen und Winterroggen in vier physiologischen Berechnungsperioden beschrieben (Tab. 6.1.5). Grundlage für die Fallzahl-Simulation sind die Modelle von Karvonen und Peltonen (1991) für Winterweizen und von Laurila et al. (1992) für Roggen. Eine Modifizierung und Anpassung an die Verhältnisse in Deutschland wurde durchgeführt.

Die Fallzahländerung unterliegt in jeder der vier Phasen dem Einfluss unterschiedlicher meteorologischer Parameter. Allen Phasenabschnitten liegen Temperatursummenfunktionen zugrunde, die z. T. mit weiteren meteorologischen Parametern tagesbezogen gewichtet werden. Während in den ersten beiden Phasen hauptsächlich die Temperatur dominiert, beginnen während der relativ kurzen Keimruhe Dauer Niederschlagseffekte einzuwirken. In Phase 4 ist die Fallzahlempfindlichkeit gegenüber der Feuchte anfangs noch hoch, lässt dann ab der intern errechneten Voll- und Totreife aber nach. Der Winterweizen reagiert mit seinen Fallzahlverlusten weniger sensibel auf Anfeuchtungseffekte als der Roggen.

Tabelle 6.1.5: Berechnungsperioden für Weizen und Roggen zur Bestimmung der Fallzahl

	Weizen	Roggen
<b>1. Phase</b> (vor dem Fallzahlenanstieg)	Ährenschieben – frühe Milchreife	Ährenschieben – Wasserreife
<b>2. Phase</b> (Fallzahlenanstieg vor der Keimruhe)	frühe Milchreife – Teigreife	Wasserreife – Milchreife
<b>3. Phase</b> (Fallzahl während der Keimruhe)	Teigreife – Gelbreife	Milchreife – Teigreife
<b>4. Phase</b> (nach der Keimruhe)	Gelbreife – Totreife	Teigreife – Totreife

Abb. 6.1.10: Vergleich der gemessen (Punkte) und berechneten (Linie) Fallzahlen für Winterweizen, Standort Braunschweig 2007



In Abbildung 6.1.10 ist der berechnete Verlauf der Fallzahl von Winterweizen für das Jahr 2007 zu sehen. Der Vergleich der Modellberechnungen mit den fünf Messungen zeigt eine zufriedenstellende Übereinstimmung.

#### Rohproteingehalt und Sedimentationswert

Neben der Fallzahl und der Fallzahlstabilität sind Eiweißgehalt, Sedimentationswert, Backfähigkeit und Mahlfähigkeit wichtige Sorteneigenschaften, namentlich bei Weizen und Roggen. Die Backfähigkeit des Mehles lässt sich aus dem Proteingehalt und dem Sedimentationswert berechnen oder direkt über den Backversuch ermitteln (Haumann, G. et al., 2011). Der Eiweißgehalt wird nachhaltig durch die mineralische und organische N-Düngung beeinflusst und erfolgt in der guten fachlichen Praxis in mehreren Stadien, sodass in Abhängigkeit von Witterung, Temperatur- und Niederschlagsaufkommen ein Austrag von Nährstoffen in den Untergrund und das Grundwasser vermieden werden soll.

Mittlere Eiweißgehalte, mittlere Rohproteingehalte, die auch als Qualitätsmerkmal für die marktwirtschaftliche Verwertung gelten, liegen zwischen 13,0 und 13,3 %. In der beschreibenden Sortenliste wird der Proteingehalt ebenfalls in Abhängigkeit von den Sorten geprüft und bewertet. In der Regel erfolgt eine Stadiendüngung, die in Teilgaben von der Bestockung über das Schossen bis zur Kornfüllungsphase verabreicht wird und sich an die standort- und kulturspezi-

fische N-Obergrenze bemisst. Die Teilgaben müssen an den Entwicklungsstand der Pflanzen, die Befahrbarkeit des Bodens, den Feuchtegehalt im gesamten Wurzelraum und die ermittelte bodenbürtige Stickstoffnachlieferung angepasst werden.

Der Sedimentationswert beschreibt als weiteres Qualitätsmerkmal des Backweizens die Kleberqualität. Als Kleber bezeichnet man die aus dem Mehl auswaschbaren Proteine, die das Quellvermögen, das Gashaltvermögen und die Elastizität des Teiges bestimmen und mit Hilfe des Sedimentationswertes erfasst werden. Ein schlechter Sedimentationswert von unter 20 ml deutet auf eine schlechte Backqualität und eine vorrangige Verwertung als Futterweizen hin. Eine genetisch festgelegte gute Kleberqualität führt zu einer hohen Teigausbeute, guten Teigeigenschaften, hohem Gebäckvolumen, zarter Krumenbeschaffenheit und einer einwandfreien Kruste (Bolling, 1986).

Abschließend ist festzuhalten, dass die Qualitätseigenschaften bei Getreide genetisch festgelegt sind, aber durch gezielte Sortenwahl, produktionstechnische Maßnahmen und die Einwirkungen der Witterung und des Klimas beeinflusst werden können. In Abhängigkeit von den Witterungseinflüssen wird bei der Sortenwahl insbesondere dem Reifetermin, einer möglichen Frühsommertrockenheit, sowie der Früh- oder Spätsaatverträglichkeit im Herbst Rechnung getragen.

## Literatur

Aufhammer, W. (1998): Getreide und andere Körnerfruchtarten: Bedeutung, Nutzung und Anbau. Verlag E. Ulmer, Stuttgart.

Begon, M., Harper, J. L., Townsend, C. R. (1991): Ökologie: Individuen, Populationen, Lebensgemeinschaften. Birkhäuser Verlag, Basel.

Bolling, H. (1986): Was bedeutet Weizenqualität? BLG-Mitteilung 101,13 S. 1-4.

Doorenbos und Kassam (1979): Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33. Rome, FAO.

FAO (2013): Statistical Yearbook (Faostat), abgerufen am 17.01.2016.

Häckel, H. (1999): Meteorologie, 4. Auflage, Ulmer, S. 211.

Halse, N.J., Weir, R.N. (1970): Effects of Vernalization, Photoperiod and Temperature on Phenological Development and Spikelet Number of Australian Wheat. Aust. J. Agric. Res. 21, 383-393.

Haumann, G. et al. (2011): Halm- und Körnerfrüchte, in: Lehrbuch des Pflanzenbaues, Band 2: Kulturpflanzen, Agro-Concept GmbH, Bonn, S. 311-456.

Hay, R. K., Delécolle R. (1989): the setting of rates of development of wheat plants at crop emergence: influence of environment on rates of leaf appearance. Ann. Appl. Bio. 115 (2), S. 333-341.

Heger, K. (1973): Abschätzung des Witterungsrisikos auf die Ernte des Getreides mit dem Mähdröschler unter Benutzung eines agrarmeteorologischen Modells. Berichte über Landwirtschaft Bd. 51 Nr. 1, S. 176-207.

Karvonen, T., Peltonen, J. (1991): A Dynamic Model for Predicting the Falling Number of Wheat Grains. In Scandinavian climatic Conditions. Acta Agric. Scand., 41., S. 65-73.

Lancashire, P.D., Bleiholder, P., Langenlütdecke, P., Stauss, R., Van den Boom, T., Weber, E., Witzinger, A. (1991): An uniform decimal code for growth stages of crops and weeds. Ann. Appl. Biol. 119, 561-601.

Laurila, L., Karvonen, T., Hiivola, S.-L. (1992): A dynamic model for predicting the falling number of rye grains in Finnish (Ostrobothnian) Conditions. Agricult. Science in Finland, 1., S. 57-71.

LWK (2015): Ratgeber Pflanzenbau und Pflanzenschutz, Ausgabe 2015, 19. Auflage, Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen.

Oehmichen, J. (1986): Pflanzenproduktion, Band 2: Produktionstechnik. Verlag Paul Parey, Berlin und Hamburg.

Perten Instruments: Falling Number – Application & Method

Scheffer, F., P. Schachtschabel (1998): „Organische Substanz“ und „Bodenorganismen“, in: Lehrbuch der Bodenkunde 14. Auflage, S. 45 – 86, Ferdinand Enkeverlag; Stuttgart

Schönberger, H., Parzefall, J., Bauer, B., Gebel, D., Hanhart, H., Klingenhagen, G. (2006): Getreide anbauen wie die Profis; Bestände aufbauen, führen, schützen. top agrar Ratgeber.

Strauß, R., Bleiholder, H., van den Boom, T., Buhr, L., Hack, H., Heß, M., Klose, R., Meier, U., Weber, E. (1994): Einheitliche Codierung der phänologischen Entwicklungsstadien mono- und dikotyler Pflanzen. Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft.

top agrar (2012): Serie Getreidebau/Kornfüllung: 2. Blattfläche, groß genug und gesund!, Landwirtschaftsverlag Hiltrup Münster.

Witzenberger, A., Hack, H., Van den Boom, T. (1989): Erläuterungen zum BBC-Dezimal-Code für die Entwicklungsstadien des Getreides – mit Abbildungen. Gesunde Pflanzen 41, 384-388.

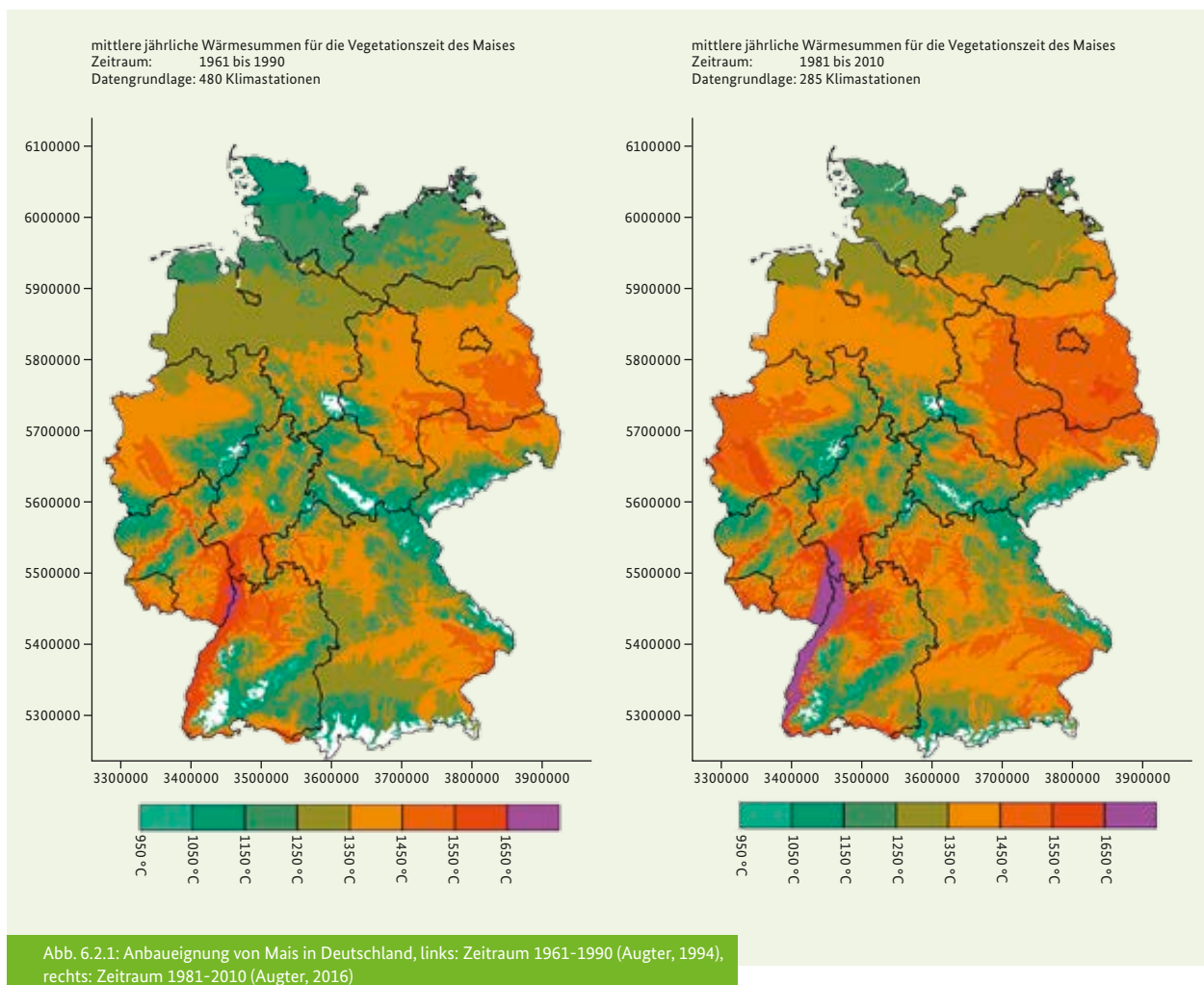
## 6.2 Mais

Autoren: Falk Böttcher, Cathleen Frühauf

Nach Weizen steht Mais in Deutschland auf Platz zwei der Belegung der landwirtschaftlichen Nutzfläche mit einer Anbaufläche von etwas über 2,5 Mio. Hektar im Jahr 2015 (DESTATIS, 2016). Der Anteil von Silomais beträgt dabei mehr als 80 %. Die restlichen weniger als 20 % teilen sich Körner- und CCM-Mais. Dabei liegen die deutschlandweiten Durchschnittserträge bei etwa 414 dt/ha bei Silomais (35 % Trockenmasse) und 88 dt/ha bei Körnermais (DESTATIS, 2016). Das Erntegut wird in Deutschland einerseits als Futtermittel und andererseits als energetischer Rohstoff zur Biogasproduktion verwendet. Insbesondere dieser Grund sorgte in den letzten Jahren für eine deutliche Zunahme der Anbauflächen des Silomais und in manchen Regionen Deutschlands zu einer sehr starken Konzentration des Maisanbaus mit zunehmend enger gewordenen Fruchtfolgen. Der Körner- und CCM-Maisanbau ist leicht rückläufig.

### 6.2.1 Klimatische Bedingungen

Angesichts der Herkunft des Mais aus Mittelamerika und der langjährigen züchterischen Bearbeitung wurden auch potenzielle abiotische, in der Mehrzahl agrarmeteorologische



Stressfaktoren berücksichtigt. Das sind in erster Linie Kälte- und Hitzetoleranz sowie Toleranz im Hinblick auf Trockenheit. In Augter (1994) finden sich Aussagen zur Anbaueignung von Mais in Deutschland auf der Basis einer Wärmesumme über der Basistemperatur von 8 °C in den Monaten April bis November. Ein Vergleich der Auswertungen der Zeiträume 1961-1990 und 1981-2010 zeigt eine deutliche Verbesserung der Anbaubedingungen (Abb. 6.2.1). Die höchsten Wärmesummen finden sich in Deutschland im Oberrheingraben gefolgt von der Kölner Bucht, dem Kraichgau, dem unteren Donautal, der Leipziger Tieflandsbucht und Brandenburg, wobei in letztgenannten Regionen neben der thermischen Anbaueignung auch die Frage der ausreichenden Wasserversorgung betrachtet werden muss. Maisanbau findet auch in den Mittelgebirgen statt, dabei muss aber beachtet werden, dass die Wärmesumme mit der Höhe abnimmt.

Mit den durch den Klimawandel steigenden Temperaturen, setzt der Vegetationsbeginn früher ein, so dass auch die Sommerungen früher ausgesät werden können. Abbildung 6.2.2 zeigt den nach Janssen (2009) berechneten Vegetationsbeginn für die Zeiträume 1961-1990 und 1981-2010. Zwischen diesen beiden 30-Jahres-Zeiträumen ergibt sich im Mittel eine Verfrüherung von vier bis fünf Tagen.

Mit dem Anstieg der Durchschnittstemperaturen hat sich die potenziell zum Maisanbau geeignete Fläche in Deutschland vergrößert. Auf spät- und frühfrostdgefährdeten Standorten ist, trotz der auch dort gestiegenen Lufttemperaturmittelwerten, die terminlich nur wenig geänderte Frostgefahr bei der Anbaumentscheidung zu beachten. Durch den früheren Vegetationsbeginn verschieben sich spätfrostdgefährdete Entwicklungsphasen der Pflanzen in frühere Zeiträume. Dies hat zur Folge, dass trotz steigender Temperaturen die Spätfrostdgefährdung sogar zunehmen kann.

Mais sollte erst dann ausgesät werden, wenn die Keimtemperatur von 8 °C im Boden zwischen 5 und 10 cm im Frühjahr erreicht worden ist. Bei einer zu frühen Aussaat kommt es zu Entwicklungsverzögerungen, während bei einem thermisch optimal gewählten Saatzeitpunkt ein rascher Feldaufgang und eine gute Jugendentwicklung gewährleistet sind. Mit den steigenden Lufttemperaturen verändern sich auch die Bodentemperaturverhältnisse in der Aussaatzeit. Abbildung 6.2.3 zeigt die mit dem Modell BEKLIMA (siehe Kapitel 4.4) berechneten, mittleren Bodentemperaturen in 5 cm Tiefe zur Mais-Aussaat (15.4.-5.5.) für den Standort Braunschweig. Über den gesamten Zeitraum ab 1961 wurde die notwendig Keimtemperatur von 8 °C erreicht. Ab Mitte der 90er Jahr ist eine deutliche Zunahme für den betrach-

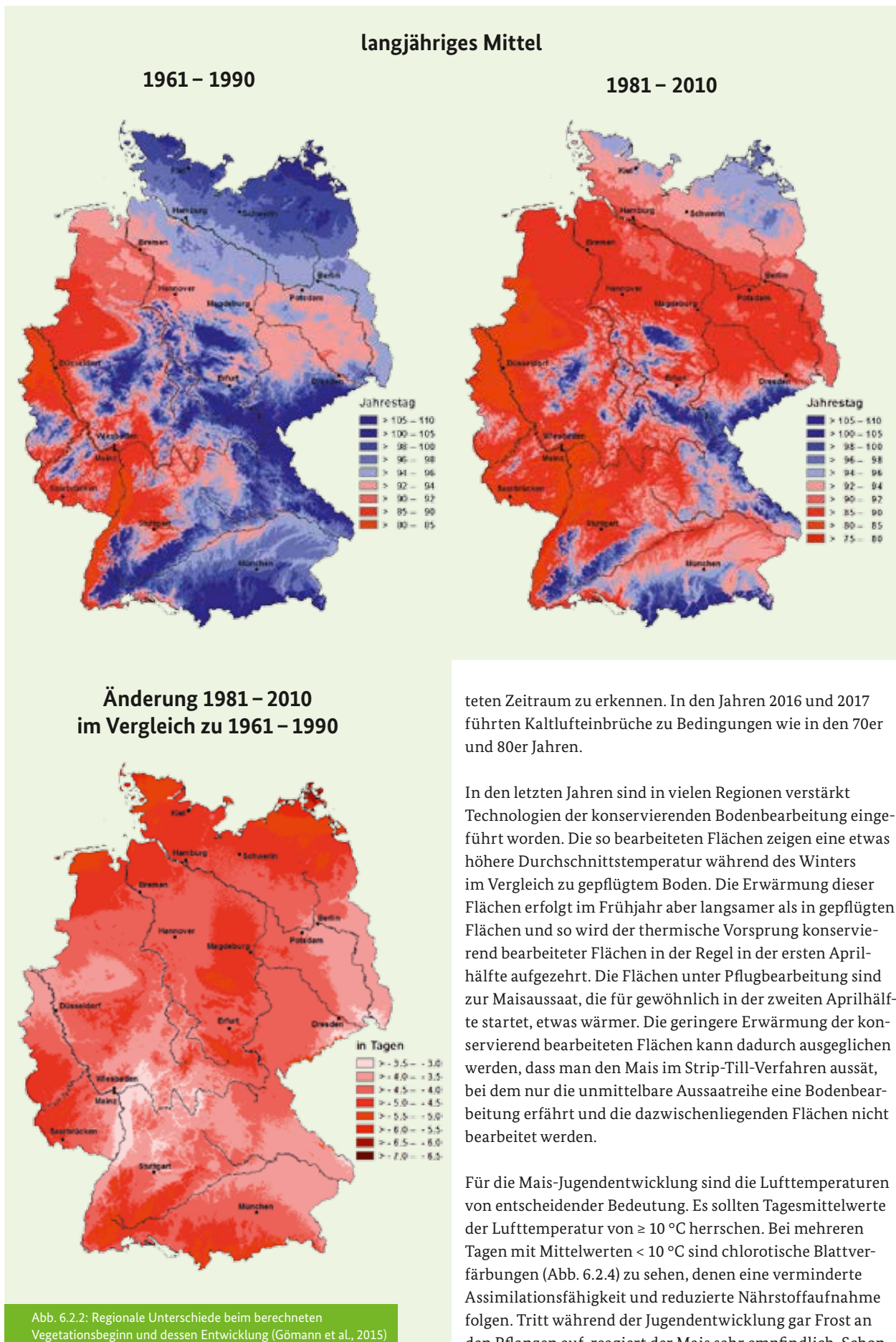
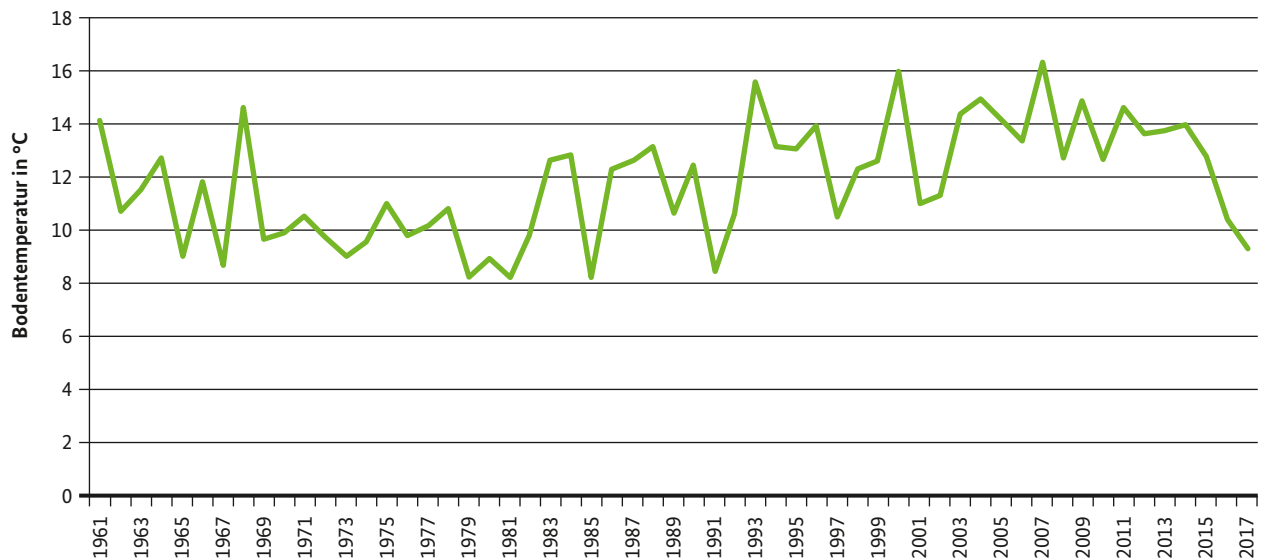




Abb. 6.2.3: berechnete Bodentemperaturen (in 5 cm Tiefe) im Aussaatzeitraum für Mais (15.04.-05.05.), 1961-2017, Standort Braunschweig



bei Werten  $< -3$  °C frieren die betroffenen Blätter ab. Ist von dem Frost sogar der Vegetationskegel der Pflanze betroffen, bleibt nur eine Neuaussaat (Meßner, 2000).

Eine weitere Herausforderung in der Jugendphase ist die Windempfindlichkeit des Maises besonders bei großen Schlägen. Diese Empfindlichkeit resultiert einerseits aus einer Art „Sandstrahleffekt“, wenn bei lebhaftem Wind feinste Bodenteilchen abgehoben und durch den Wind bodennah transportiert werden (Winderosion) und dann die Pflanzen durch diese Bodenteilchen mechanisch beschädigt oder gar zerstört werden, und andererseits aus der noch nicht so kräftig ausgeprägten Pflanzenstruktur (Abb. 6.2.5). Die beiden beschriebenen Windeffekte können aber minimiert werden, wenn die Rauigkeit der Bodenoberfläche erhöht wird. Dies ist besonders bei allen Ausprägungen der konservierenden Bodenbearbeitung durch die verbleibenden Pflanzenreste der Fall (Nitzsche et al., 2002).

Eine konservierende Bodenbearbeitung minimiert auch die Erosionsgefahr durch Wasser, wenn die Monate April und Mai durch kräftige Schauer geprägt sind. Besonders erosionsgefährdet sind geneigte Anbauflächen bei intensiven Niederschlägen im Zeitraum von der Vorbereitung des Bodens für die Maisbestellung bis zu dem Zeitpunkt zu dem der Mais etwa 50 cm Wuchshöhe erreicht hat. Der Bodenabtrag wird durch konservierende Bodenbearbeitung minimiert, denn insbesondere die Infiltrationsleistung des Regenwassers selbst stärkster Intensität ist gegenüber der des gepflügten Bodens um ein Vielfaches höher und so ist die Erosionsgefahr wesentlich geringer. Verursacht wird dieser Effekt durch biologische Grobporen (insbesondere Gänge von Regenwürmern, Nitzsche et al., 2002).

Besonders in der Jugendentwicklung des Maises ist die Wasserkonkurrenz zu diversen Unkräutern beachtenswert. Zwar ist in dieser Entwicklungsphase der Wasserbedarf des

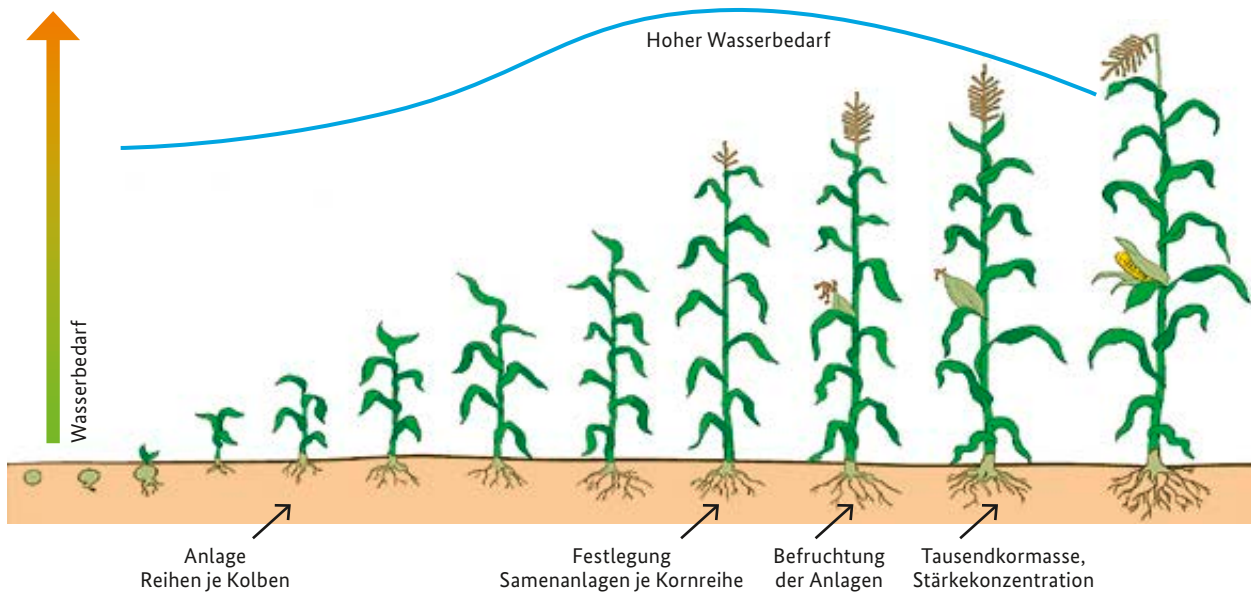


Abb. 6.2.4: Chlorotische Blattverfärbungen an jungen Maispflanzen, Braunschweig 13.05.2014, Foto: C. Frühauf, DWD-ZAMF



Abb. 6.2.5: Durch Wind bedingtes Lager an einem jungen Maisbestand, Braunschweig 06.07.2015, Foto: C. Frühauf, DWD-ZAMF

Abb.6.2.6: Wasserbedarf in Abhängigkeit der Pflanzenentwicklung bei Mais (Kühne, 2016, verändert)

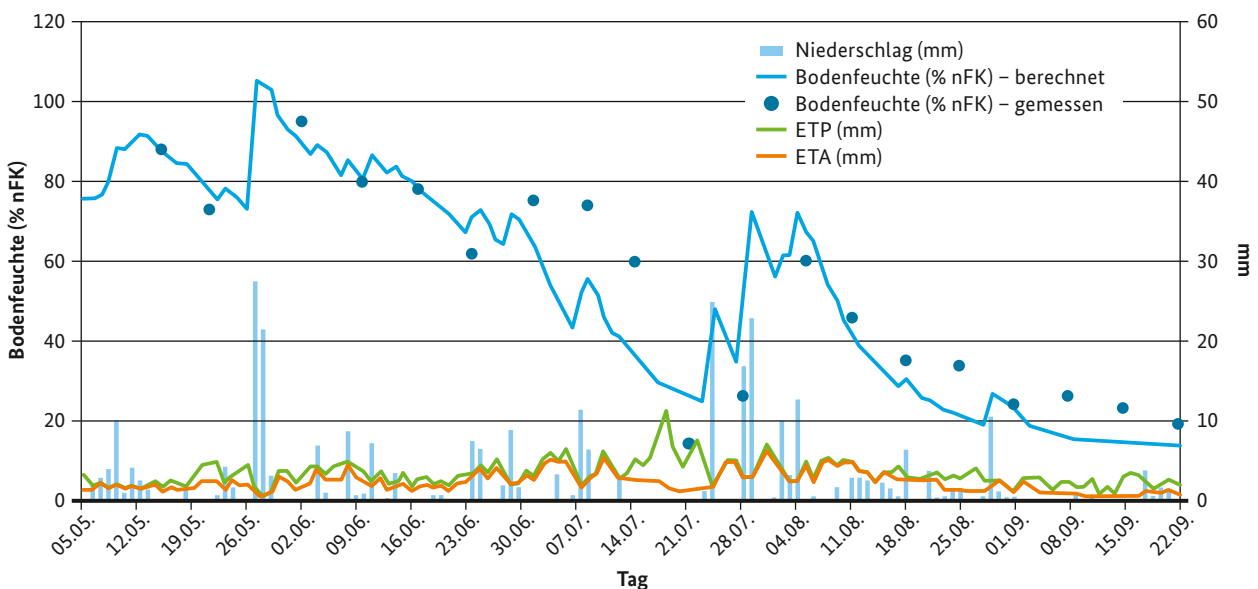


Maises allgemein gering und das Bodenwasserangebot in der Regel bei den meisten Böden im optimalen Bereich, aber der Wasserverbrauch durch die Unkräuter sorgt für eine Reduktion des Bodenwasser, das dann in späteren Entwicklungsphasen bei höherem Bedarf fehlt. Dies kann besonders beim Auftreten der Frühjahrs- oder Frühsommertrockenheit zu Problemen führen.

Mais benötigt für die Produktion eines Kilogramms Trockenmasse etwa 200 bis 300 Liter Wasser. Der Hauptwasserbedarf setzt mit der Blüte um Mitte Juli ein und dauert bis Ende August (Abb. 6.2.6), wenn die Trockensubstanz der Maispflanze ca. 50 % der Gesamtpflanzenmasse ausmacht. Die Modellierung des Wasserhaushaltes eines Maisbestandes

erfolgt durch das Modell AMBAV (siehe Kapitel 4.4, „Verdunstung und Wasserhaushalt“ unter [http://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/ku\\_beratung/landwirtschaft/agrар\\_modelle/agrarmeteorologische\\_modelle.html](http://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/ku_beratung/landwirtschaft/agrар_modelle/agrarmeteorologische_modelle.html)). Abbildung 6.2.7 zeigt die gute Übereinstimmung der gemessenen mit der berechneten Bodenfeuchte. Aktuelle Evapotranspirationsraten bis 7 mm je Tag sind dabei die maximal möglichen Werte. Um Wachstumsdepressionen zu vermeiden, sollte der Versorgungsgrad des Bodens mit Wasser in der genannten Entwicklungsphase nicht unter 50 % der nutzbaren Feldkapazität sinken (Abb. 6.2.8). Setzt Wassermangel früh zur Blüte ein, wird das Wachstum und die Kolbenbildung gebremst und in Verbindung mit heißen Tagen (Tage mit Höchsttemperaturwerten  $\geq 30^\circ\text{C}$ ) kommt es zu unzureichender Befruchtung.

Abb. 6.2.7: Berechneter und simulierter Bodenfeuchteverlauf (0-60 cm) unter einem Maisbestand 2014, ETP – potentielle Pflanzenverdunstung, ETA – aktuelle Pflanzenverdunstung, Modell AMBAV.



Fehlt das Wasser nach Abschluss der Befruchtung, wird die Assimilation bzw. die Assimilationsumlagerung in den Kolben blockiert (Meßner, 2000).

### 6.2.2 Tierische Schaderreger

Tierische Schaderreger sind im Mais ebenfalls von Bedeutung und weisen hinsichtlich ihrer Entwicklung Abhängigkeiten von den meteorologischen Bedingungen auf. Dies gilt zunächst für den Maiszünsler (*Ostrinia nubilalis*). Maiszünsler gehören zu den Kleinschmetterlingen. Schädigend am Maiszünsler ist der Fraß an der Pflanze durch die Larven (Abb. 6.2.9). Die FAO (2013) schätzt, dass durch den Maiszünsler etwa 4 % der Erntemenge der Welt vernichtet wird. In Deutschland liegen die Werte deutlich darunter, können aber auf Schlägebene auch beträchtliche Ausfälle für den Einzelbetrieb auslösen.

Unter den klimatischen Bedingungen der letzten Jahrzehnte konnte in Deutschland bisher nur eine Generation ausgebildet werden. Die Erwärmung der letzten Dekaden zeigt aber, dass die Bedingungen für die Ausbildung einer zweiten Generation zunehmend gegeben sind. In Süddeutschland wurden die biovoltine Rasse erstmalig 2006 nachgewiesen und breiten sich seitdem stark aus. Maiszünsler haben ein Potential zur Ausbildung von bis zu sechs Generationen im Jahr.

Die in den Maisstopplern überwinternden Raupen verpuppen sich im Frühjahr. Nach knapp zwei Wochen schlüpfen die Falter meist im Juni und beginnen dann im Mais aber auch an bis zu 20 weiteren Pflanzenarten die Eier an den Blattunterseiten abzulegen. Mit Hilfe einer Temperatur-

summe kann der Flugbeginn und die Eiablage abgeschätzt werden. Abbildung 6.2.10 zeigt beispielhaft den Verlauf der Temperatursumme für die beiden Stationen Mannheim und Braunschweig. Der Flugbeginn setzt bei einem Wert von 320 Gradtagen, die Eiablage bei 400 Gradtagen ein. Für den wärmeren Standort Mannheim war 2016 im Vergleich zu Braunschweig ein um eine Woche früherer Flugbeginn zu erwarten. Die berechneten Eiablage-Termine weichen sogar um 9 Tage voneinander ab.

Je höher die Lufttemperatur steigt, umso schneller schlüpfen die Raupen. In der Regel dauert dies ein bis zwei Wochen. Dann beginnen sie sofort mit ihrer Fraßtätigkeit. Die sechs Entwicklungsstadien, die als Larve durchlaufen werden, dauern etwa 50 Tage. Die Entwicklung kann bei höheren Lufttemperaturwerten schneller und bei geringeren Werten langsamer ablaufen.

Neben einer Bekämpfung durch Schlupfwespen kann der Maiszünsler durch den Einsatz von Insektiziden bekämpft werden. Hierbei sind dann wieder die meteorologischen Bedingungen zur Ausbringung (Abdriftvermeidung, Ausbringung zu agrarmeteorologisch optimalen Zeitpunkten hinsichtlich Lufttemperatur und Luftfeuchte) zu beachten.

Ein weiterer Schädling ist der von Süden nach Deutschland einwandernde Westliche Maiswurzelbohrer (*Diabrotica virgifera virgifera* LeConte, Abb. 6.2.11). Schäden treten durch Larvenfraß an den Wurzeln und durch das Verzehren der Narbenfäden der Kolben durch die erwachsenen Käfer auf. Auch seine Entwicklung ist temperaturgesteuert. Der Westliche Maiswurzelbohrer war bis 2014 in Deutschland ein Quarantäneschädling. Man hatte versucht, ihn wieder auszurotten, einzugrenzen oder zu unterdrücken (Julius Kühn-Institut, 2011).



Abb. 6.2.8: Durch Wasserstress verursachte Wachstumsdepression bei Mais. Links: unberegnert, rechts: beregnert, Braunschweig 25.08.2016, Foto: C. Frühauf, DWD-ZAMF

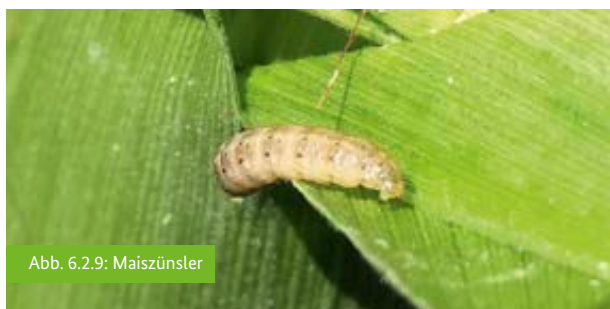


Abb. 6.2.9: Maiszünsler



Abb. 6.2.11: Maiswurzelbohrer

### 6.2.3 Pilzliche Schaderreger

Für mögliche pilzliche Schaderreger (beispielsweise für Schimmelpilze der Gattung *Fusarium*) gilt, dass feuchtwarmes Wetter infektionsgünstig ist (Pflanzenschutzdienste, 2016). In der Landwirtschaft und Lebensmittelindustrie bereiten Kolbenfusariosen große Probleme, da die Kontamination des Erntegutes mit Mykotoxinen eine massive Gesundheitsgefährdung für Mensch und Tier darstellt (Infodienst Landwirtschaft, 2017). Die Bekämpfung des Maiszünslers verringert eine Beschädigung der Kolben und erzieht den Kolbenfusariosen ihren idealen Nährboden. Eine direkte Bekämpfung der Krankheit mit Fungiziden ist derzeit nicht möglich. Zukünftig vielversprechend erscheint die Möglichkeit, in der Züchtung weniger anfällige Sorten zu selektieren.

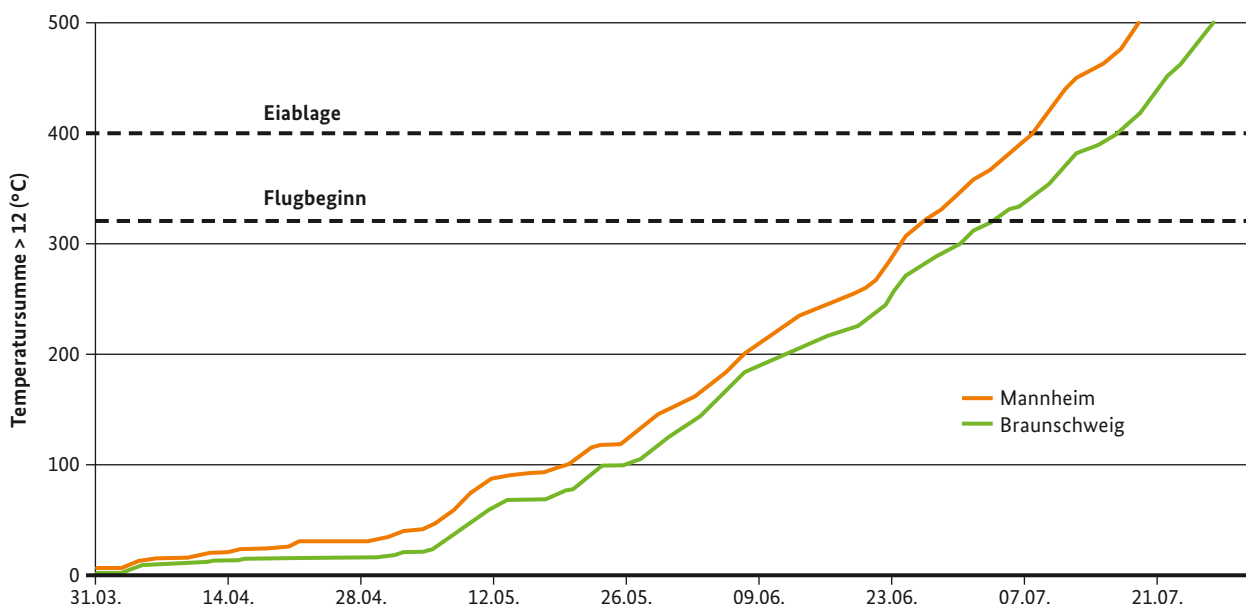
### 6.2.4 Modelle

Die Entwicklung der Maispflanze, insbesondere ihre spätere Abreife (Sinken des Wassergehaltes, Anstieg der Trockenmasse), ist in starkem Maße von der Witterung abhängig.

Der DWD betreibt dazu in enger Kooperation mit dem Deutschen Maiskomitee e.V. ein von der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel entwickeltes Prognosemodell (Herrmann et al. 2005, Rath et al. 2005; [www.maisprog.de](http://www.maisprog.de)). Es dient zur Bestimmung des Erreichens des optimalen Erntezeitpunktes anhand der optimalen Futterqualität (28-34 % Trockenmasse bei Silomais). Vom Modell wird die Trockenmasse (TM) für jeden Tag im Zeitraum August bis Oktober vorhergesagt („Maisabreife“ unter [http://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/ku\\_beratung/landwirtschaft/agrar\\_modelle/agrarmeteorologische\\_modelle.html](http://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/ku_beratung/landwirtschaft/agrar_modelle/agrarmeteorologische_modelle.html)).

Das etwas vom DWD modifizierte Modell startet mit dem Erreichen des phänologischen Entwicklungsstadiums „Männliche Vollblüte“ (BBCH 65). Um Reifegruppenunterschiede abzubilden, wird die Berechnung mit unterschiedlichen Startwerten der Trockenmasse für früh, mittelfrüh bzw. mittelspät reifenden Maissorten gestartet. Durch die Angaben der Züchter zum Abreifeverhalten können neue Sorten im Modell berücksichtigt werden. Bis zum Erreichen von 25 % Trockenmasse des Kolbens ist die Grundlage der Berechnung eine Lufttemperatur-Zeit-Funktion, danach wird der Niederschlag mit berücksichtigt. Bei der Betrachtung der Gesamtpflanze verläuft der Trockenmassezuwachs

Abb. 6.2.10: Temperatursumme zur Bestimmung des Flugbeginns und der Eiablage des Maiszünslers am Beispiel der Stationen Mannheim und Braunschweig, 2016.



langsamer als beim Kolben. In späten Entwicklungsstadien wirkt sich Wassermangel beschleunigend auf die Zunahme des TM-Gehaltes aus.

Bei trockenen und heißen Jahren kann es dazu kommen, dass es unter der Wirkung von Trockenstress zu einer Verstrohung des Bestandes kommt, die vom Modell nicht mehr korrekt abgebildet wird. Unter solchen extremen Witterungsverhältnissen kann der Trockenmassegehalt der Gesamtpflanze vom Modell unterschätzt werden. Unter normalen Bedingungen zeigen die Ergebnisse des Modells – gestützt auf das Trockenmasse-Monitoring ausgewählter Praxisbetriebe – sowohl hinsichtlich der Reifegruppen wie auch in Bezug auf die Ortshöhe eine gute Übereinstimmung mit realen Werten und eine deutliche Verbesserung gegenüber reinen Temperatursummenansätzen. Körnermais schließt die Assimilat-Einlagerung bei einer Kornfeuchte zwischen 33 und 35 % ab. Um den Bruchkornanteil und die Trocknungsnotwendigkeit gering zu halten, sollte das Erntegut bei diesen Kornfeuchtwerten eingefahren werden (Meßner, 2000).

Herbstliche Frühfröste sind für den Mais eine Gefahr. Sinkt die Lufttemperatur im Maisbestand im Herbst mehrere Stunden unter  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , beendet der Mais vorzeitig die Kornabreife und die Bestände sind dann irreversibel geschädigt. Bei der Ernte sowohl des Silomaises wie auch des Körnermais muss die Befahrbarkeit der Flächen beachtet werden. Dafür stellt der DWD einen modellbasierten Ansatz zur Verfügung. Als erste grobe Näherung kann die Bodenfeuchte herangezogen werden. Liegt diese unterhalb von 85 % der nutzbaren Feldkapazität, darf davon ausgegangen werden, dass ein Befahren der Flächen ohne schädigende Bodenverdichtungen möglich ist.

## Literatur

Augter, G. (1994): Berechnung und Regionalisierung von Mais-Wärmesummen, Selbstverlag Deutscher Wetterdienst Offenbach am Main.

Augter, G. (2016): unveröffentlicht.

DESTATIS (2016) <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/LandForstwirtschaftFischerei/FeldfruechteGruenland/Tabellen/FeldfruechteZeitreihe.html> (aufgerufen am 05.06.2016 14:50 Uhr)

Gömann, H., Bender, A., Bolte, A., Dirksmeyer, W., Englert, H., Feil, J.-H., Frühauf, C., Hauschild, M., Krenzel, S., Lilienthal, H., Löpmeier, F.-J., Müller, J., Mußhoff, O., Natkhin, M., Offermann, F., Seidel, P., Schmidt, M., Seintsch, B., Steidl, J., Strohm, K., Zimmer, Y. (2015): Agrarrelevante Extremwetterlagen und Möglichkeiten von Risikomanagementsystemen: Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL); Abschlussbericht: Stand 3.6.2015. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 312 p, Thünen Rep 30, doi:10.3220/REP1434012425000.

Herrmann, A., Kornher, A., Taube, F. (2005): A new harvest time prognosis tool for forage maize production in Germany. *Agricultural and Forest Meteorology* 130, 95-111.

Infodienst Landwirtschaft – Ernährung – Ländlicher Raum Baden-Württemberg (2017): Vorbeugung gegen Fusariumbefall und Toxinbelastung bei Mais durch Resistenzzüchtung. (aufgerufen am 27.7.2017 12:20 unter <https://www.landwirtschaft-bw.info/pb/site/lel/node/644839/Lde/index.html>)

Janssen, W. (2009): Definition des Vegetationsanfanges. Abteilung Agrarmeteorologie, DWD intern. unveröffentlichtes Manuskript.

Julius-Kühn-Institut (2011): [http://www.jki.bund.de/fileadmin/dam\\_uploads/\\_veroeff/faltblaetter/Maiswurzelbohrer.pdf](http://www.jki.bund.de/fileadmin/dam_uploads/_veroeff/faltblaetter/Maiswurzelbohrer.pdf); abgerufen am 05.06.2016 um 14:45 Uhr

Kühne, B. (2016): Trockenstress auf trockenen sandigen Böden vermeiden. *Praxisnah* 4/2016, 6-7.

Meßner, Helmut (2000): Mais; in Lütke Entrup & Oehmichen (Hrsg.): Lehrbuch des Pflanzenbaus, Band 2: Kulturpflanzen; Verlag Th. Mann, Gelsenkirchen

Nitzsche, O., Krück, S., Zimmerling, B., Schmidt, W. (2002): Boden- und gewässerschonende Landbewirtschaftung in Flusseinzugsgebieten. In: Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Heft 11.

Pflanzenschutzdienste der Bundesländer Berlin, Brandenburg, Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen (2016): Pflanzenschutz in Ackerbau und Grünland 2016, Selbstverlag

Rath, J., Herrmann, A., Höppner, F. (2005): MaisProg – Abreife und Ernte von Silomais schätzen. *Mais* 3/2005, 94-96.

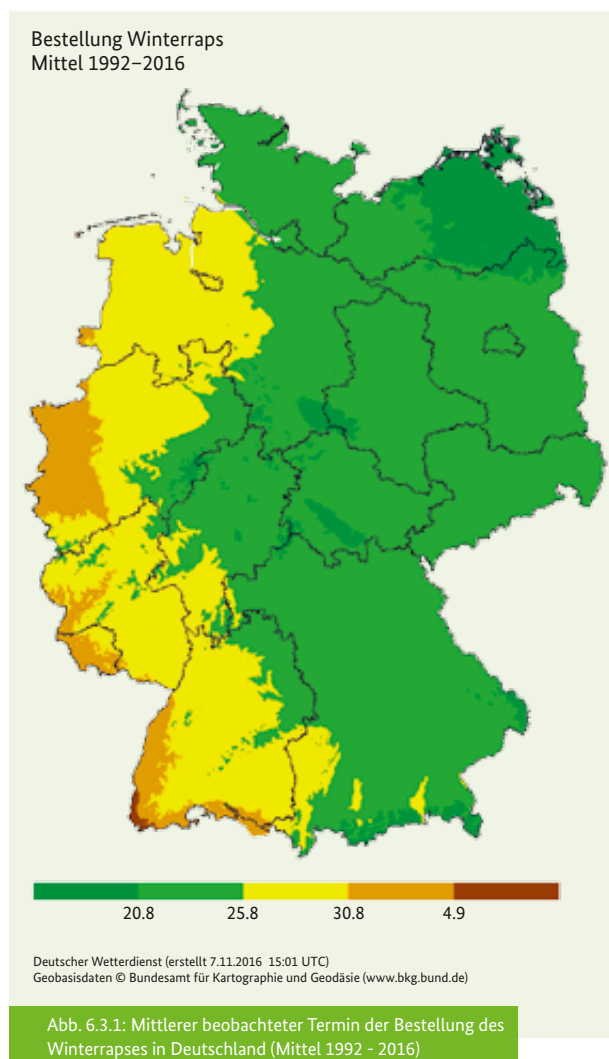
## 6.3 Winterraps

Autoren: Martin Schmidt, Cathleen Frühauf

Der Winterrapsanbau nimmt an der in Deutschland als Ackerland genutzten Fläche einen Anteil von ca. 8 % ein, im Vergleich zum Weizen, der im Jahr 2015 auf 28 % der gesamten Ackerfläche angebaut wurde. Ab Mitte August wird die Bestellung durchgeführt, wobei der mittlere Termin in den letzten 25 Jahren etwa um den 25.08. lag (DWD, 2016). Aussaaten nach dem 5. September werden auch in günstigen Anbaulagen riskanter, weil zwar einerseits genügend oberirdische Blattmasse entwickelt wird, die Wurzelbildung aber nicht optimal verläuft (LWK, 2016).

Abbildung 6.3.1 zeigt die regionale Verteilung des Aussaattermines. In kühleren Regionen erfolgt die Aussaat früher, während eine spätere Aussaat in wärmeren Gebieten notwendig ist, um ein Überwachsen im Herbst zu vermeiden.

Im August, als Sommermonat, wird die Keimtemperatur im Boden auf jeden Fall erreicht. Das Auflaufen des Winterraps



es erfolgt Anfang/Mitte September (je nach Bestelltermin und Witterung) etwa 12 Tage nach der Bestellung. Für einen guten Feldaufgang ist neben hochwertigem Saatgut auch ein feinkrümeliges und gut abgesetztes Saatbett notwendig. Ziel der Bodenbearbeitung ist es, günstige Voraussetzungen für das Wurzelwachstum zu schaffen. Eine optimale Wurzelentwicklung ermöglicht den Kulturpflanzen am ehesten, das standortspezifische Ertragsoptimum zu realisieren. Gleichzeitig werden so Risiken für negative Begleiterscheinungen des Ackerbaus wie Erosion und Schadverdichtungen minimiert. Diese Ziele können aber nur erreicht werden, wenn die Bodenbearbeitung zum günstigsten Zeitpunkt erfolgt. Dieser wird vor allem durch die Bodenfeuchte bestimmt. Zu feucht bearbeitete, bindige Böden werden plastisch verformt und verschmieren. Bodenschadverdichtungen können bei unangepasstem Befahren durch Druck und Schlupf schwerer Geräte entstehen. Das in den Boden eindringende Niederschlagswasser kann sich dann über einer kompakten Pflugsohle stauen und eine tiefere Durchwurzelung des Bodens behindern. Erfolgt die Bodenbearbeitung bei zu trockenen Bedingungen entstehen grobe Schollen und Klumpen (Kluten). Die darin enthaltenen Wasser- und Nährstoffvorräte sind unzugänglich für die Wurzeln. Vor und auch noch nach dem Aufgang des Winterrapses sind gegebenenfalls Herbizidanwendungen notwendig, um die gleichmäßige Entwicklung des Bestandes nicht zu gefährden.

Bis zum Eintritt in die Vegetationsruhe im Spätherbst sollte der Bestand, damit er gut in den Winter kommt, folgende Merkmale aufweisen (LWK, 2016):

- gesund,
- etwa 8 - 10 Blätter je Pflanze,
- gut entwickelndes tiefreichendes Wurzelsystem,
- Wurzelhalsdurchmesser etwa 8 - 10 mm und
- keine beginnende Stängelbildung.

Der Anbau von Winterraps wird durch seine Frosthärte von -20 bis -25 °C begrenzt. Insbesondere tiefe Temperaturen ohne schützende Schneedecke (Kahlfröste) sind gefährlich. Lütke Entrup und Oehmichen (2006) geben an, dass unter diesen Bedingungen der Winterraps bereits ab einer Temperatur von -8 °C in 2 m Höhe über Grund Schaden nehmen kann. Ist die Winterraps pflanze im Herbst bereits so stark gewachsen, dass die oberen Pflanzenteile aus einer geschlossenen Schneedecke heraus schauen, dann besteht ebenfalls die Gefahr des Erfrierens. Über Schnee werden in sogenannten Strahlungsnächten (keine Bewölkung, kaum Wind) in Bodennähe deutlich tiefere Temperaturen als über schneefreien Flächen erreicht. Mit dem Modell BEKLIMA kann aus der stündlichen Temperatur in 2 m Höhe die Temperatur in Erdbodennähe (5 cm Höhe über Grund) sowie die Höhe einer Schneedecke berechnet werden. Verharscht die Schneedecke, kommt es zum Ausfaulen. Die dadurch entstehenden Verluste werden ebenfalls als Auswinterungsschäden betrachtet.

Beim Winterraps setzt bereits sehr früh nach dem Winter der Vegetationsbeginn ein, wobei bereits leicht positive Tagesmitteltemperaturen ausreichend sind. Mit dem Wachstumsbeginn wird in der Regel auch die erste Düngergabe ausge-

bracht. Je nach Wetter und Befahrbarkeit ist das zwischen Mitte Februar bis Anfang März der Fall. Mineralische oder organische Düngemittel müssen der Pflanze als Startgabe nach dem Winter zugeführt werden.

Durch das Ausbringen der Gülle und Gärresten zum optimalen Zeitpunkt und mit emissionsarmer Technik können Ammoniakverluste minimiert werden. Unterstützt werden die Landwirte hierbei durch ein AMBER-Teilmodell, das die Verluste für die Ausbringung zu unterschiedlichen Tageszeiten berechnet („Ammoniakverluste“ unter [http://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/ku\\_beratung/landwirtschaft/ agrar\\_modelle/agrarmeteorologische\\_modelle.html](http://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/ku_beratung/landwirtschaft/ agrar_modelle/agrarmeteorologische_modelle.html)). Hierbei wird von einer Mischgülle (Rinder- und Schweinegülle) mit einem vorgegebenen Gesamtstickstoffgehalt ausgegangen. Bereits angesprochen wurde die Befahrbarkeit. Diese ist vor allem im Frühjahr kurz nach dem Vegetationsbeginn häufig eingeschränkt, wenn die Böden mit Wasser gesättigt oder übersättigt sind. Um keine Schäden durch Bodenverdichtungen zu verursachen, muss auf eine ausreichende Befahrbarkeit geachtet werden. Das AMBER-Teilmodell zur Bodenbefahrbarkeit gibt über Güteklassen einen Hinweis auf die Bodenverhältnisse der kommenden Tage. Hierbei wird, ausgehend von der Bodenfeuchte, die Befahrbarkeit der landwirtschaftlichen Nutzflächen als mittlerer Wert

über den gesamten Tag angegeben, wobei neun Bodenarten Beachtung finden. Bereits Tage im Voraus kann somit eingeschätzt werden, ob eine Befahrbarkeit der Flächen tendenziell gegeben sein wird oder nicht.

Nach dem Vegetationsbeginn im Frühjahr beginnt der Winterraps mit der Bildung der Knospen. Geht der Winterraps schließlich ins Längenwachstum, wird es Zeit für die zweite Stickstoff-Gabe. Ab einer Wuchshöhe von 30 bis 50 cm und Temperaturen oberhalb von 12 °C können im Winterraps Wachstumsregler eingesetzt werden. Der Einsatz empfiehlt sich bevorzugt in üppigen Beständen mit hoher Ertrags- erwartung sowie bei lageranfälligen Sorten.

Während des Längenwachstums zeigen sich üblicherweise die ersten Vorblüher (einzelne blühende Rapspflanzen – weit vor der Hauptblüte des Bestandes). Sind blühende Pflanzen im Bestand, sei es auch nur Unkraut, so muss dies bei der Bekämpfung der Rapsschädlinge beachtet werden. Nutzinsekten wie Bienen, sind besonders schützenswert und diese werden von blühenden Pflanzen angelockt. Bienengefährliche Pflanzenschutzmittel dürfen deswegen nicht oder nur unter Auflagen in blühenden Beständen angewendet werden (Abb. 6.3.2).



Abb. 6.3.2: blühender Winterrapsbestand, Foto: F. Falke, DWD-ZAMF.

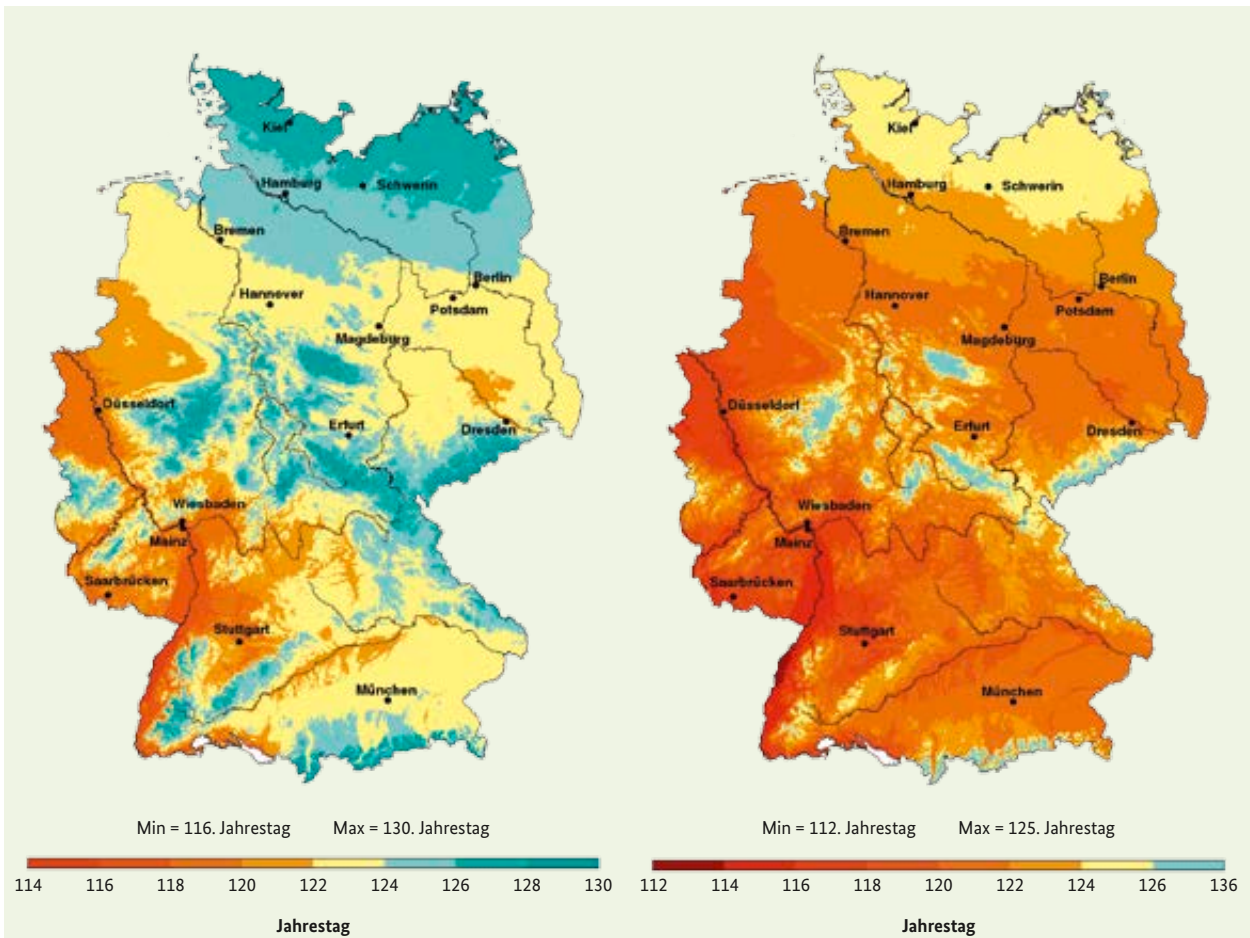


Abb. 6.3.3: Jahrestag des Beginns der Vollblüte Winterraps (berechnet), links: Mittel 1961-1990, rechts: 2017 (Quelle: Deutscher Klimaatlas 2017)

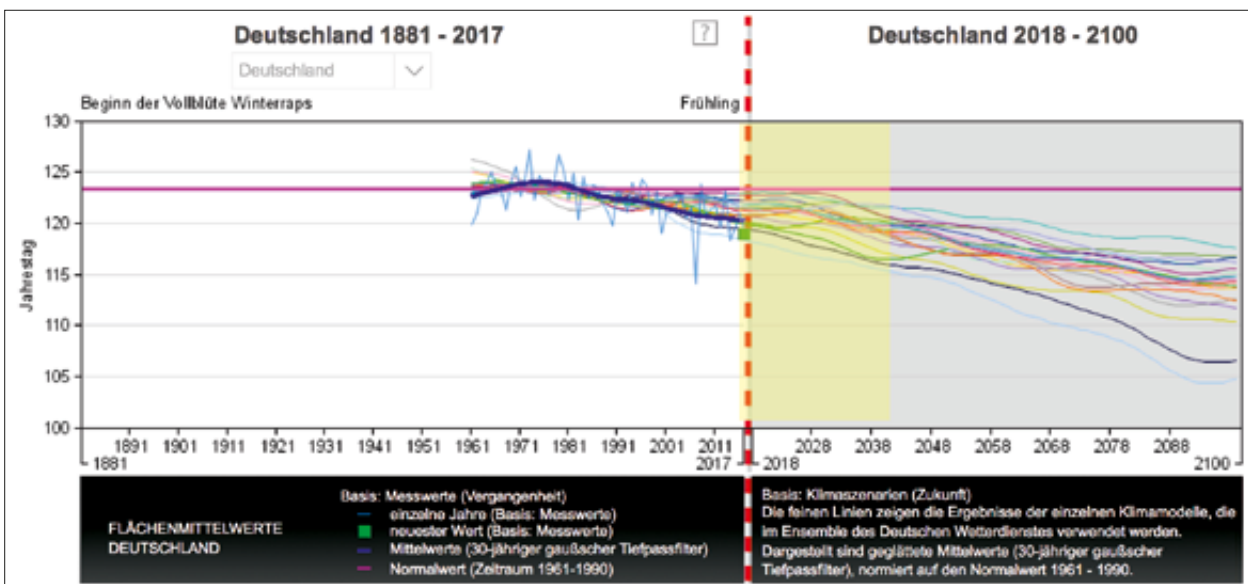


Abb. 6.3.4: Jahrestag des Beginns der Vollblüte Winterraps (berechnet) als Deutschlandmittel für den Zeitraum 1961 - 2100 (Quelle: Deutscher Klimaatlas 2017)



Für den korrekten Einsatz von Insektiziden müssen die auf den Mittel angegebenen Anwendungsempfehlungen, die dem Bienenschutz dienen, berücksichtigt werden:

- **B.1:** keine Anwendung von Pflanzenschutzmitteln auf blühende oder von Bienen beflogenen Pflanzen (gilt auch für Unkräuter)
- **B.2:** Anwendung nach dem täglichen Bienenflug bis 23.00 Uhr
- **B.3:** nicht bienengefährlich.

Wie viele andere phänologische Phasen ist auch bei der Rapsblüte eine Verfrühung durch den Klimawandel zu beobachten (siehe Kapitel 2.5). Abbildung 6.3.3 zeigt Karten aus dem Klimaatlas (vgl. Kapitel 8.2). Um Aussagen über die Zukunft treffen zu können, wurde diese phänologische Phase mithilfe einer Temperatursumme berechnet, die auf der Grundlage von phänologischen Beobachtungen der Vergangenheit entwickelt wurde. Der Beginn der Vollblüte des Winterrapses ist links als langjähriges Mittel 1961-1990 und rechts exemplarisch für das Jahr 2017 dargestellt. Deutlich ist die Verfrühung um drei bis sechs Tage zu erkennen. Die Auswertung der Klimaprojektionen zeigt, dass sich die Verfrühung weiter fortsetzen wird (Abb. 6.3.4). So liegt das Deutschlandmittel für den Zeitraum 1961-1990 um den 3. Mai (123. Jahrestag). Durch die geglättete Kurve (dunkelblau) ist bis zum Jahr 2017 eine Verfrühung von etwa vier Tagen zu erkennen. Die 21 Klimaprojektionen zeigen im Mittel eine weitere Verfrühung von etwa einer Woche bis zum Ende dieses Jahrhunderts.

Beim Bienenflug spielen nicht nur die meteorologischen Klimaelemente Strahlung, Temperatur, Luftfeuchte, Niederschlag und Wind eine Rolle, sondern auch tierbiologische und blühphänologische Entwicklungsgrößen. Die meteorologischen Flugbedingungen für Bienen werden in einem AMBER Modul („Bienenflug“ unter [http://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/ku\\_beratung/landwirtschaft/agrarmeteorologische\\_modelle.html](http://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/ku_beratung/landwirtschaft/agrarmeteorologische_modelle.html)) berechnet und unter anderem auf den Internetseiten des DWD für die Freizeitgärtner ([http://www.dwd.de/DE/fachnutzer/freizeitgaertner/1\\_gartenwetter/\\_node.html](http://www.dwd.de/DE/fachnutzer/freizeitgaertner/1_gartenwetter/_node.html)) klassifiziert ausgegeben.

Neben der Temperatur steuern die Lichtbedingungen den Beginn und das Ende des Flugs. Schon aufgrund der niedrigen Temperaturen beginnt die Flugaktivität morgens selten vor Sonnenaufgang, jedoch ist abends bei sonst guten äußeren Bedingungen ein Rückflug letzter Bienen bis Ende der Dämmerung möglich. Bedeckte oder stark bewölkte Tage lassen bei gleichen Temperaturen, verglichen mit sonnigen Tagen, einen deutlich schwächeren Bienenflug erkennen. Die Windgeschwindigkeit hat im unteren Bereich keinen Einfluss auf den Bienenflug, erst bei hohen Werten setzt eine Flugabnahme ein. Ähnliches gilt für den Niederschlag. Das Modell gibt einerseits die Bienenflugintensität und andererseits den Beginn und das Ende des Bienenfluges aus.

Im weiteren Vegetationsverlauf reift der Winterraps ab und wird für gewöhnlich zwischen der Wintergerste und dem Winterweizen im Juli oder August – je nach Witterung – geerntet. Die Abreife erfolgt im Winterraps von oben nach

unten. Während die oberen Schoten schon sichtbar abgereift sind und teilweise aufplatzen, sind die Schoten weiter unten noch nicht reif. Es entsteht optisch der Eindruck, dass bereits erste Ernteverluste aufgetreten sind. Viel ertragswirksamer sind aber die Schoten des mittleren und unteren Bereiches, die bei optimaler Ausbildung von Haupttrieb und Verzweigungen den Hauptertrag liefern.

### 6.3.1 Tierische Schädlinge

#### Rapserrdflö

Nach dem Auflaufen können tierische Schaderreger an den jungen Rapspflanzen Fraßschäden verursachen. Neben der schädigenden Wirkung durch Ackerschnecken, liegt seit der Einschränkung der Beizmöglichkeit des Winterrapssaatgutes der Fokus auf dem Rapserrdflö. Bis zum 2-Blatt-Stadium sollten zur Schädlingsüberwachung Gelbschalen in den Rapsbeständen ausgebracht werden (Abb. 6.3.5). Die Aktivität des Rapserrdflö kann mittels eines Modells beschrieben werden, welches ab dem Auflaufen des Winterrapses angewendet wird.

Die Berechnung der täglichen Indizes für die Eiablage- und Flugintensität erfolgt abhängig von Temperaturmaxima, Sonnenscheindauer, Wind und Bodenfeuchtigkeit. Die Flug- und Eiablageintensität wird mit einem Index zwischen 0,0 (unmöglich) bis 1,0 (maximal begünstigt) ausgegeben. Abbildung 6.3.6 zeigt den Verlauf für den Herbst 2016. Neben dem Index für die Flug- und Eiablageintensität sind die in der Beratung an die Landwirte weitergegebenen Termine als Säulen gekennzeichnet. Voraussetzung für die Bekämpfung von Schädlingen im Raps, werden von Beratungsinstitutionen (u.a. LWK, 2016) eingehend beschrieben.



Abb. 6.3.5: Gelbschale in einem Winterrapsbestand, Braunschweig 2016, Foto: C. Frühauf, DWD-ZAMF



Abb. 6.3.7: Rapsglanzkäfer

Der Rapserdflor hinterlässt runden Lochfraß an den Keim- und Laubblättern. Der Hauptschaden entsteht in der Regel jedoch durch den Minierfraß der Larven, welche die Pflanzenteile aufplatzen und es besteht eine größere Auswinterungsgefahr. Zudem bieten die Einbohrstellen günstige Angriffspunkte für pilzliche Erreger wie z. B. die Wurzelhals- und Stängelfäule.

#### Kohlschotenrüssler, Kohltriebrüssler und Rapsglanzkäfer

Besonderes Augenmerk muss nach dem Vegetationsbeginn im Frühjahr auf die Rapsschädlinge Kohlschotenrüssler, gefleckter Kohltriebrüssler und Rapsglanzkäfer (Abb. 6.3.7) gelegt werden.

Das Auftreten dieser Schädlinge kann mithilfe von Gelbschalen kontrolliert werden, die rechtzeitig in den Rapsbestand gebracht werden müssen. In den milden Regionen Süd- und Westdeutschlands sollten die Gelbschalen bei warmer Witterung bereits Anfang Februar aufgestellt werden, um nicht einen möglichen frühen Flugbeginn des Gefleckten Kohltriebrüsslers und des Großen Rapsstängelrüsslers zu

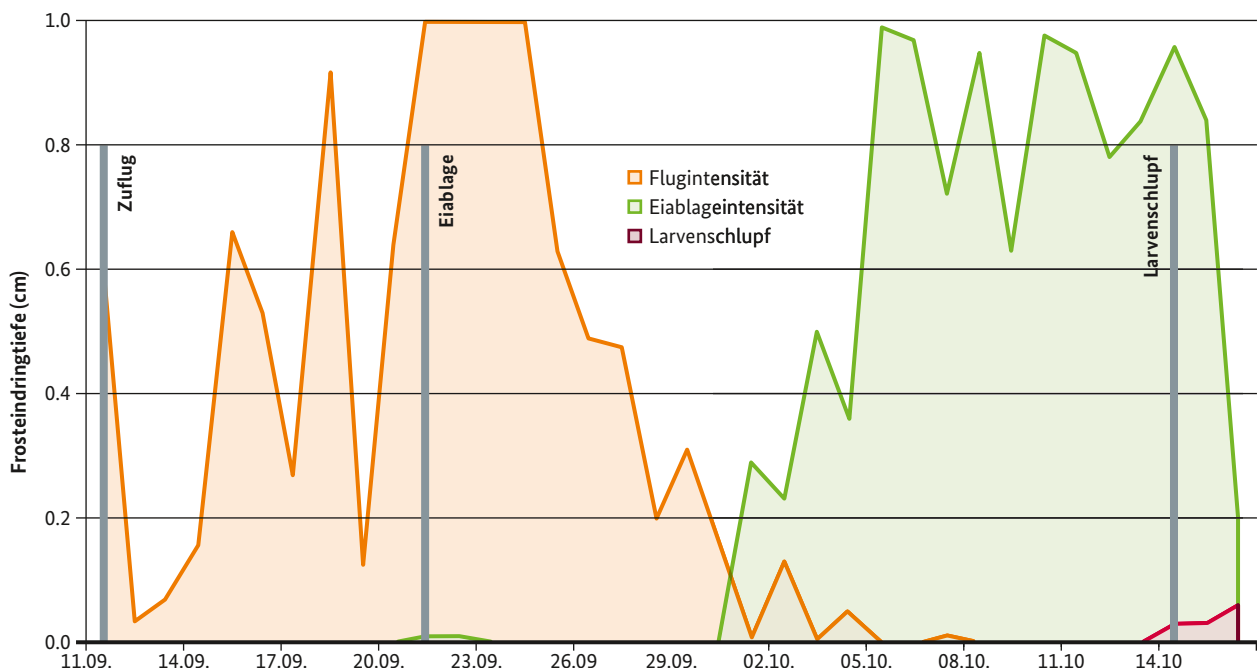
verpassen. In den anderen Gebieten müssen die Gelbschalen etwa Mitte Februar/Anfang März in den Bestand.

Der Rapsstängelrüssler wird bereits bei Temperaturen von 5 °C im Boden bzw. 9 °C in der Luft aktiv. Je nach vorherrschenden Witterungsverhältnissen ist seine Zuwanderung häufig schon Ende Februar/Anfang März zu beobachten. Die Schädigung des Winterrapses äußert sich bei diesem Insekt durch Lochfraß an den Stängeln sowie Bohrlöcher für die Eiablage. Die Eiablage des Käfers beginnt nach kurzem Reifungsfraß. Die späteren Ausbohrlöcher in den Blattachsen bilden Infektionsquellen für Pilzkrankheiten. Sonnenschein, Wärme und Windstille bieten dem Schädling optimale Ausbreitungsbedingungen.

Der Gefleckte Kohltriebrüssler wird etwas später bei Lufttemperaturen um 12 °C aktiv. Seine unmittelbare Schädigung ist geringer, allerdings gelten diese Beschädigungen ebenfalls als Wegbereiter für Pilzkrankungen. Zusätzlich zu den Gelbschalen werden bei Kohltriebrüssler und Rapsstängelrüssler ergänzende Bestandeskontrollen nach der Linienbonitur empfohlen.

Mit der Knospenbildung im Winterraps setzt auch der Flug des Rapsglanzkäfers ein. Der Flughöhepunkt des Rapsglanzkäfers tritt bei vollentwickelten, von Laubblättern nicht mehr umhüllten Knospen auf. Der Käfer frisst von außen die Knospen an, um an den Pollen zu gelangen. Das Schadbild sind an- und ausgebissene Knospen. Die Knospen vertrocknen und fallen ab. Die Folge ist eine verringerte Anzahl von Schoten und damit ein geringerer Ertrag. Die Bekämpfung dieses Schädlings ist zurzeit der Knospenbildung sinnvoll. Ist der Raps erblüht, gelangt der Käfer ohne beißen zu müssen an den Pollen und übernimmt dann sogar eine gewisse Bestäubungsfunktion.

Abb. 6.3.6: Verlauf der berechneten Indizes für die Flugintensität, Eiablage und den Larvenschlupf des Rapserdflors 2016, Braunschweig.



Über Temperatursummenfunktionen wird in Abhängigkeit von verschiedenen Schwellenwerten der Temperatur ab dem 1. Februar das Verlassen des Winterlagers der Käfer durch ein AMBER-Teilmodell modelliert. Damit kann das Datum des Erscheinens der jeweils ersten Schädlinge bestimmt werden. Bei geeigneten Flugbedingungen (warmer Frühlingstag mit wenig Wind) kann bereits am gleichen Tag der Befallsflug in den Raps beginnen. Für die Tage ab Überwinterungsende werden deshalb für jede Käferart die täglichen Indizes für die meteorologisch bedingte Flugintensität zwischen 0,0 (unmöglich) bis 1,0 (maximal begünstigt) in Abhängigkeit von Temperatur, Sonnenscheindauer und Windgeschwindigkeit berechnet. Über die Berechnung der Halbwertszeit der Entleerung der Winterquartiere ergibt sich eine Abschätzung des Hauptfluges und der Dauer des Zuflugs.

Beginnt der Winterraps zu blühen, setzt verstärkt der Zuflug des Kohlschotenrüsslers ein. Jedoch ist die Aktivität stark an die Witterung gebunden und nicht ausschließlich an die Rapsblüte. Eine besonders hohe Flugrate kann bei warmem Wetter verzeichnet werden. Der Kohlschotenrüssler bleibt bis zur Ernte im Bestand. Seine braunköpfigen Larven fressen in der Schote die Körner bis auf die Samenschale aus. Das Schadbild ist äußerlich erst an den Ausbohrlöchern der Käferlarven erkennbar. Diese bilden gleichzeitig die Eintrittsöffnungen für die Kohlschotenmücke, die dort die Eier für die Nachfolgegeneration ablegt. Es kommt dann zum Anschwellen und vorzeitigen Aufplatzen der Schoten.

### 6.3.2 Pilzliche Erkrankungen

Während der Blüte benötigt der Winterraps das meiste Wasser. Kommt es in die Blüte hinein zu Niederschlag oder verstärkter Taubildung, ist eine Infektion durch Weißstängligkeit oder Rapskrebs möglich. Die Weißstängligkeit ist eine der wichtigsten Pilzkrankheiten im Winterraps. Die nach Ausbreitung des Pilzes im Stängelinneren hervorgerufenen Ertragsverluste entstehen durch verfrühtes Aufplatzen der Schoten und durch Verringerung der Tausendkornmasse.

Die Infektionsgefährdung durch Weißstängligkeit im Winterraps (Rapskrebs) kann vorhergesagt werden. Das empirische Modell („Rapskrebs“ unter [http://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/ku\\_beratung/landwirtschaft/agrар\\_modelle/agrarmeteorologische\\_modelle.html](http://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/ku_beratung/landwirtschaft/agrар_modelle/agrarmeteorologische_modelle.html)) verwendet eine Temperatursummenfunktion (stündliche Bodentemperaturen in 5 cm Tiefe) und startet ab dem 1. Februar. Berechnet wird der Jahrestag des ersten Aufwuchses von Apothezien an der Bodenoberfläche. Der Infektionsdruck oder die Infektionsgefährdung eines oder mehrerer Tage hängt nicht nur von der Anzahl ununterbrochen günstiger infektiöser Stunden, sondern auch von der „Qualität“ dieser Stunden ab. Diese Qualität wird beeinflusst von bestimmten Temperaturwerten, relativer Luftfeuchte und der Benetzung im Bestand. Damit die Infektion gelingt, müssen mindestens 20 aufeinanderfolgende infektionsgünstige Stunden gegeben sein. Als Ergebnis wird eine Klassifizierung des Infektionsrisikos

ausgegeben. Die Bekämpfung von Rapskrebs kann mithilfe von Pflanzenschutzmitteln in der sogenannten Blütenbehandlung erfolgen.

### Literatur

DWD (2016): Winterraps Bestellung 2015 (aufgerufen am 02.05.2016 15:00).

Lütke Entrup, N., Oehmichen, J. (2006): Lehrbuch des Pflanzenbaues, Band 1: Grundlagen, Lütke Entrup, N. & J. Oehmichen (Hrsg.), AgroConcept Bonn.

LWK (2016): Der Ratgeber Pflanzenbau und Pflanzenschutz der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, 21. Auflage.

## 6.4 Kartoffeln

Autoren: Hans Helmut Schmitt, Wolfgang Janssen, Cathleen Frühauf

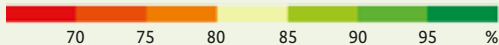
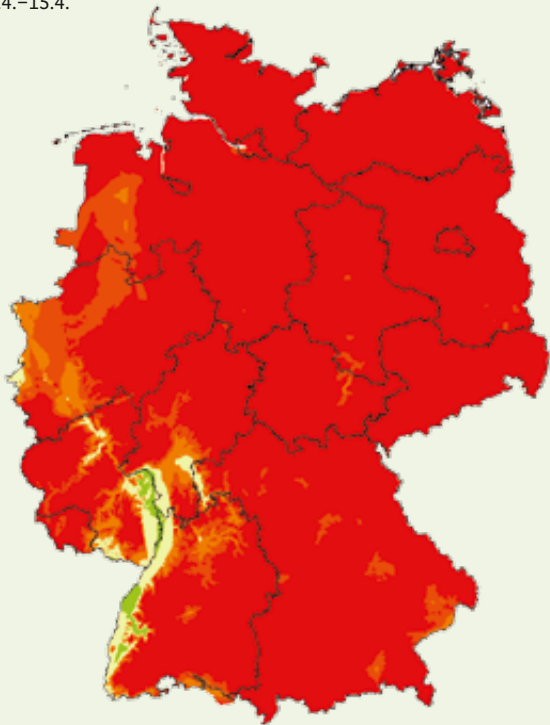
Die Kartoffel ist eine Nutzpflanze aus der Familie der Nachtschattengewächse (*Solanaceae*). Im allgemeinen Sprachgebrauch sind mit Kartoffeln meist die unterirdischen Knollen gemeint, mit denen die Pflanze vegetativ vermehrt werden kann. Die heute kultivierten Kartoffeln stammen von verschiedenen Herkunftten ab, die in Südamerika beheimatet sind. Nach Europa wurde die Kartoffel Ende des 16. Jahrhunderts von Christoph Kolumbus - ursprünglich als reine Zierpflanze - importiert.

Das Programmpaket AMBER des DWD bietet etliche Modelle, die einen optimal witterungsgeführten Kartoffelanbau ermöglichen.

### 6.4.1 Anbauvoraussetzungen und Aussaatbedingungen

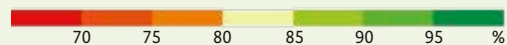
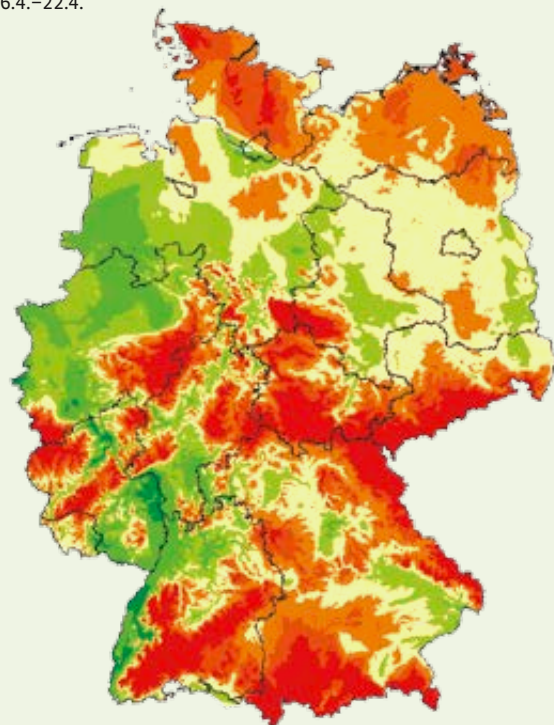
Für kultivierte Kartoffeln liegen die optimalen Temperaturbedingungen bei einem Tagesmittel zwischen 18 und 20 °C. Um die Knollenbildung zu fördern, sollte die Nachttemperatur 15 °C nicht überschreiten. Für das Knollenwachstum ist eine Bodentemperatur von 15 bis 18 °C optimal. Sinken die Temperaturen unter 10 oder steigen sie über 30 °C, stellt die Pflanze das Wachstum nahezu ein. Für die Kartoffel ist die Temperatur in der Hauptablagertiefe von 10 cm entscheidend. Mit dem Modell BEKLIMA (Braden, 1995, siehe Kapitel 4.4, „Bestandsklima“, „Mikroklima in Pflanzenbeständen“ und „Bodenklima“ unter [http://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/ku\\_beratung/landwirtschaft/agrар\\_modelle/agrarmeteorologische\\_modelle.html](http://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/ku_beratung/landwirtschaft/agrар_modelle/agrarmeteorologische_modelle.html)) kann die Bodentemperatur

Wahrscheinlichkeit für Bodentemperaturen über 8 °C  
9.4.–15.4.



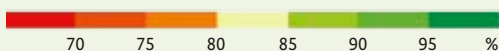
Deutscher Wetterdienst (erstellt 2.11.2016 13:17 UTC)  
Geobasisdaten © Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (www.bkg.bund.de)

Wahrscheinlichkeit für Bodentemperaturen über 8 °C  
16.4.–22.4.



Deutscher Wetterdienst (erstellt 2.11.2016 13:18 UTC)  
Geobasisdaten © Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (www.bkg.bund.de)

Wahrscheinlichkeit für Bodentemperaturen über 8 °C  
23.4.–29.4.



Deutscher Wetterdienst (erstellt 2.11.2016 13:18 UTC)  
Geobasisdaten © Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (www.bkg.bund.de)

für verschiedene Bodenarten mit geringer bis sehr hoher Wärmeleitfähigkeit und verschiedenen Folientypen für die Hauptablagertiefe berechnet werden.

Kartoffeln werden in frühe (Vegetationsdauer 90 bis 120 Tage), mittlere (120 bis 150 Tage) und späte (150 bis 180 Tage) Sorten unterteilt. Das Setzen der Pflanzkartoffeln setzt eine Bodentemperatur von mindestens 8 °C in der Ablagertiefe voraus. Längere Perioden mit Bodentemperaturen unter 8 °C bergen die Gefahr, dass die Pflanzkartoffeln in der Erde liegen und von tierischen Schädlingen bzw. bakteriellen und pilzlichen Schaderregern gefährdet werden. Daher ist in dieser Phase eine Prognose der Bodentemperaturen besonders wichtig. Ein erfolgreicher Anbau ist nur bei nachhaltig ausreichenden Bodentemperaturen möglich.

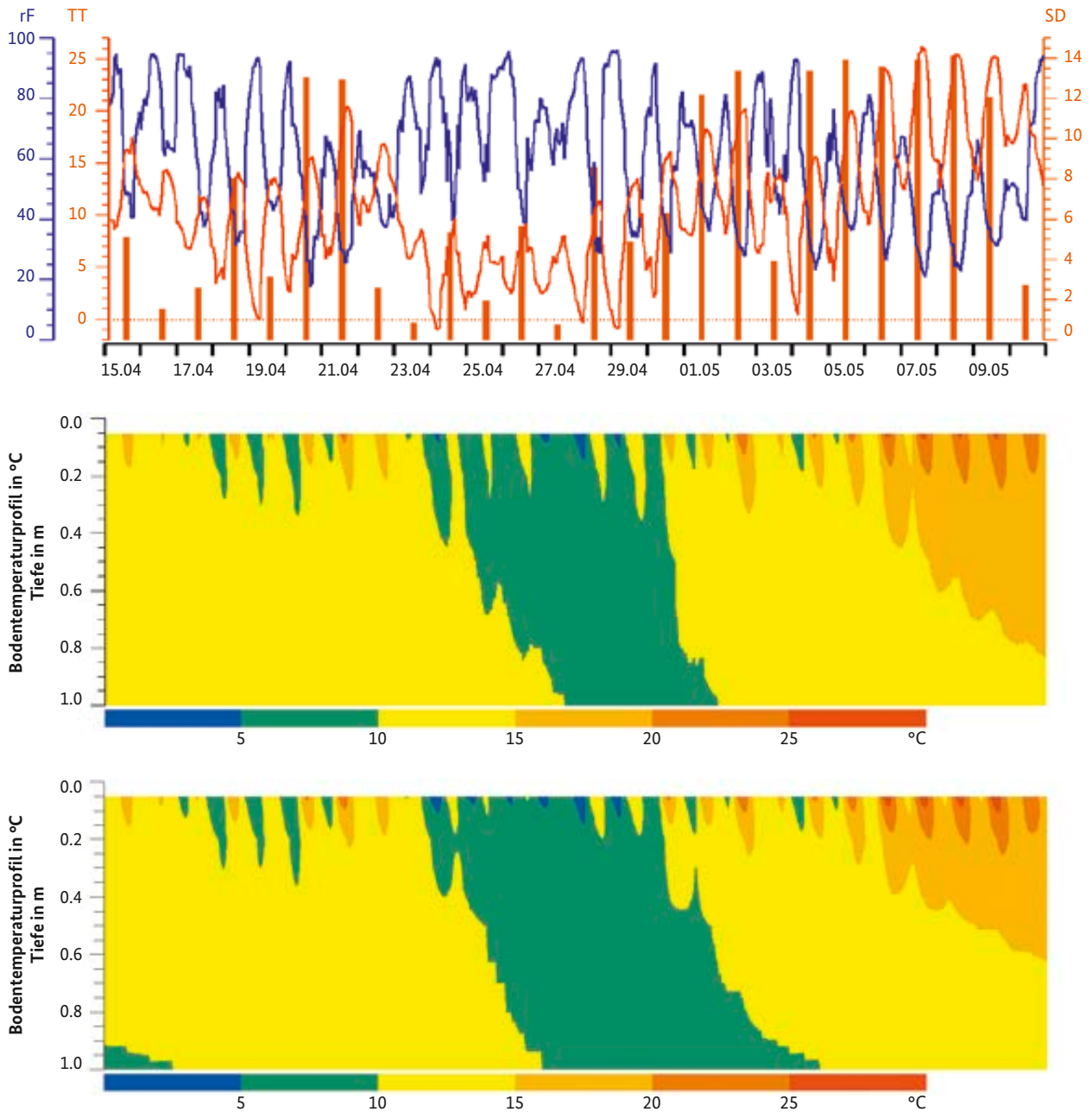
Für drei hintereinander folgende Wochen im April sind in Abbildung 6.4.1 die mittlere Wahrscheinlichkeit für Bodentemperaturen in 5 cm Tiefe von über 8 °C angegeben. Im ersten betrachteten Zeitraum (9.-15.4.) sind im Mittel lediglich im Oberrheingraben Wahrscheinlichkeiten von über 80 % für Bodentemperaturen über 8 °C zu erwarten und auch eine Pflanzung schon sinnvoll. Im letzten untersuchten Zeitraum

Abb. 6.4.1: Mittlere Wahrscheinlichkeiten für Bodentemperaturen über 8 °C in 5 cm Tiefe für die Jahre 1981 bis 2010 für 3 unterschiedliche Zeiträume. Oben links: 9.4.–15.4., oben rechts: 16.4.–22.4. und unten: 23.4.–29.4.

Abb. 6.4.2: oben: Verlauf von Temperatur, relativer Feuchte und Sonnenscheindauer; Mitte und unten: gemessenes (Mitte) und berechnetes (unten) Temperaturprofil im Erdboden in der Zeit 15.4. bis 10.5.2016, Frankfurt/Main.

Frankfurt/Main (100 m)

— rel. Feuchte in % (rF) — Lufttemperatur in °C (TT) ☰ Sonnenscheindauer in Std. (SD)



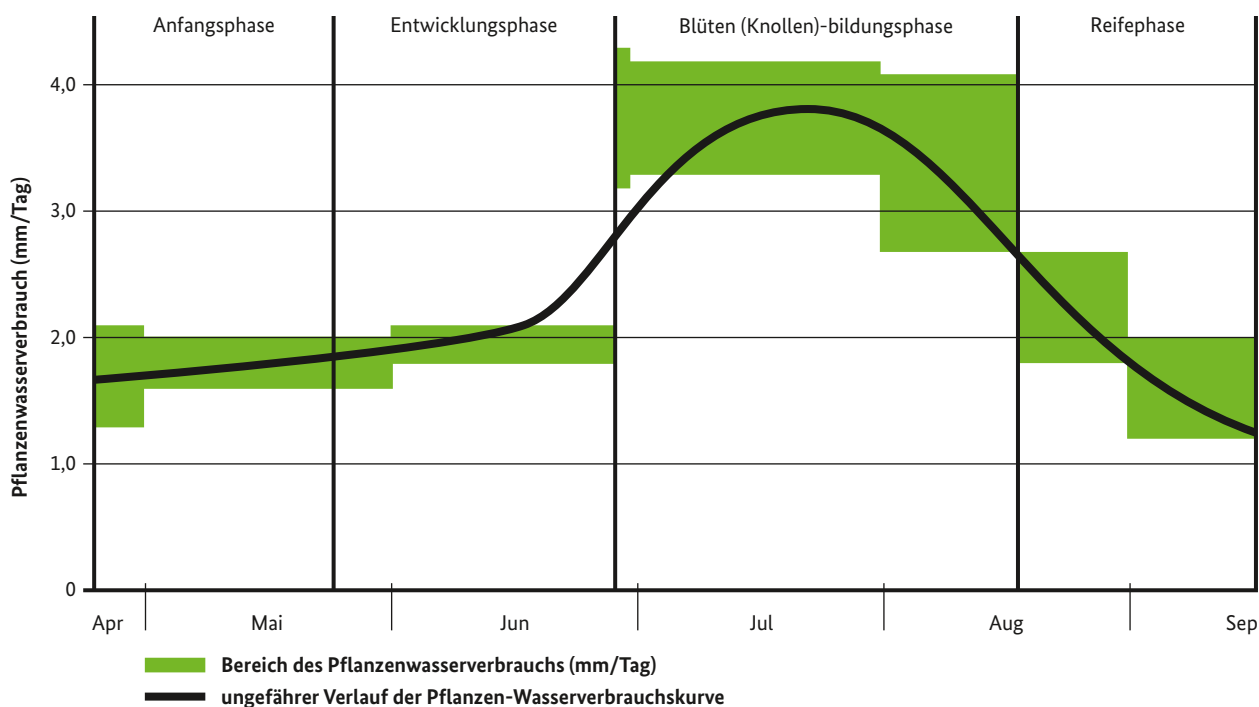
Deutscher Wetterdienst (erstellt 22.8.2017 14:33 UTC)  
Kontakt: Landwirtschaft@dwd.de

(23.–29.4.) sind bis auf die Gebirgslagen im Mittel in ganz Deutschland gute Bedingungen anzutreffen.

Grundvoraussetzung ist außerdem eine nicht zu hohe Bodenfeuchte. Ein idealer Kartoffelboden ist siebfähig, krümelstabil, klutenarm, leicht erwärmbare, steinfrei und verfügt über eine gute Wasserversorgung. Leichte Standorte neigen zu Schorf und benötigen zum Ausgleich eine Beregnung

(LWK, 2016). Schwere Standorte erwärmen sich im Frühjahr langsamer und erreichen erst später den für die Pflanzung günstigen Bodentemperaturbereich. Im Mittel über Deutschland erfolgt die Bestellung am 15.4. und das Auflaufen wird durchschnittlich 25 Tage später am 10.5. beobachtet. Unter Folienanbau liegen diese Termine natürlich früher. Zur Berechnung der Bodenfeuchte, insbesondere für die Saatbettbereitung bzw. für das Pflanzen der Kartoffeln kann

Abb. 6.4.3: Wasserverbrauch der Kartoffelpflanzen (Achnich, 1980; verändert)



das Modelle AMBAV (siehe Kapitel 4.4, „Verdunstung und Wasserhaushalt“ unter [http://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/ku\\_beratung/landwirtschaft/agrarmeteorologische\\_modelle.html](http://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/ku_beratung/landwirtschaft/agrarmeteorologische_modelle.html)) verwendet werden. Mit dem Modell BEKLIMA kann neben den Bodentemperaturen auch das Klima innerhalb des aufwachsenden Kartoffelbestandes modelliert werden. So können im weiteren Vegetationsverlauf die Temperaturen und die relative Feuchte im Bestand und damit auch die Dauer der Blattbenetzung berechnet werden. Das Modell kommt auch bei einer Frostschutzberechnung zum Einsatz (siehe Kapitel 5.2.2).

Unzureichende Bodenerwärmung kann ausgeglichen werden, wenn das Pflanzgut vorgekeimt oder zumindest in Keimstimmung gebracht wurde oder aber die Knollen unter Folie gepflanzt werden. Um die Pflanzkartoffeln in Keimstimmung zu bringen, ist eine zwei- bis dreiwöchige Lagerung bei Temperaturen um 10 °C erforderlich oder eine drei- bis viertägige bei Temperaturen um 20 °C. Wird bei zu kalten Temperaturen gepflanzt, kann sich die Wachstumszeit bis zur Ernte erheblich erhöhen. Abbildung 6.4.2 zeigt den Vergleich zwischen dem gemessenen und modellierten Profil der Erdbodentemperatur bis in eine Tiefe von einem Meter.

Der Boden sollte einen guten Luft-, Wasser- und Wärmeaustausch ermöglichen. Flache, große und zusammenhängende Flächen mit feinen, sandigen Böden ohne Steine eignen sich besonders für den Kartoffelanbau. Zudem sind Gebiete mit geringerer Luftfeuchtigkeit wegen des reduzierten Krankheitsrisikos besonders geeignet für den Kartoffelanbau. Dies sind z. B. trockenere Regionen oder höhere Lagen, in denen wegen des zumeist stärkeren Windes die Bestände schneller abtrocknen. Die Kartoffeln werden in Dämmen angebaut,

was eine bessere Erwärmung des Bodens sowie eine generell schnellere Abtrocknung der Bestände nach Regenfällen begünstigt.

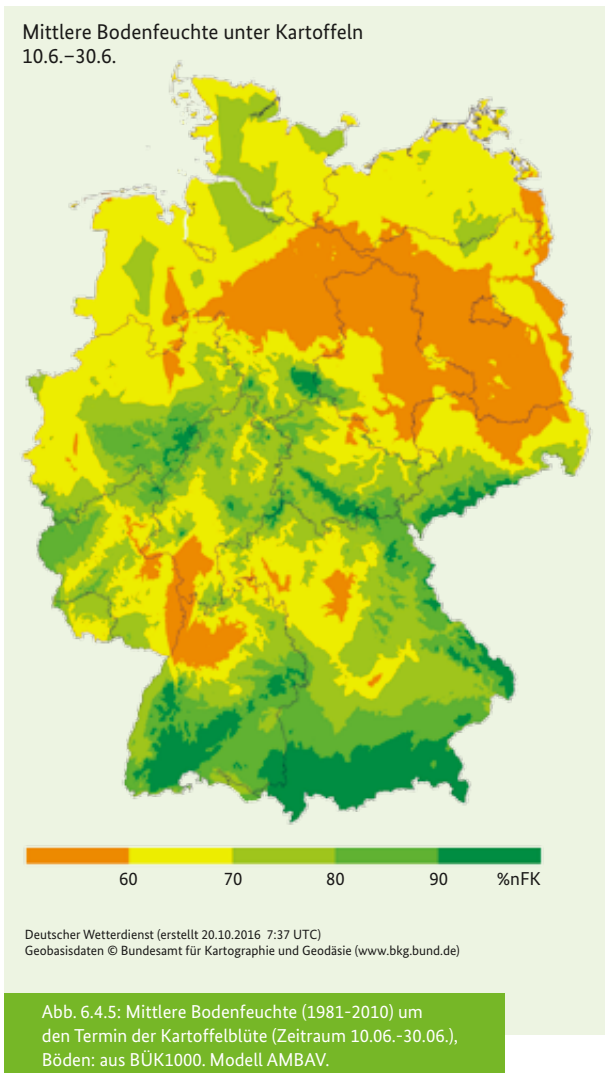
Der beste Ertrag für Sorten mit einer Reifezeit von 120 bis 150 Tagen wird bei jährlichen Niederschlägen von 500 bis 700 mm erreicht. Diese Mengen werden als Gesamtsumme in den meisten Bundesländern erreicht. Das Problem liegt aber in der zeitlichen Verteilung. Kartoffeln benötigen kontinuierlich eine ausreichende Wasserversorgung (Abb. 6.4.3). Bei längerer Trockenheit sinken nicht nur die Ertragserwartungen, vielmehr bilden sich nach erneuter Wasserversorgung Kindel (kleine Knollen), die nicht vermarktet werden können. Die Möglichkeit einer Bewässerung ist ein entscheidender Produktionsfaktor. Besonders hoch ist der Wasserbedarf ab dem Stadium der Blüte (Abb. 6.4.4 und 6.4.5), zu dem auch das Hauptwachstum der Knollen einsetzt.

Es ist natürlich von Vorteil, wenn die Wasservorräte im Boden zur Hauptwachstumszeit noch sehr hoch sind, da die Kartoffeln dann sozusagen aus dem Vollen schöpfen können. In den Gebieten mit geringerer Bodenfeuchte ist der Bedarf einer Beregnung eher gegeben (Fricke, 2008).

Mithilfe des Modells AMBAV kann die Verdunstung und damit der Wasserverbrauch verschiedener Kulturen in Abhängigkeit vom jeweiligen Boden berechnet werden. Das Modell wird seit 1999 in der Beregnungsberatung im östlichen Niedersachsen eingesetzt. Während der Beregnungszeit von April bis September werden einmal wöchentlich die Beregnungshinweise erstellt. Die Modellierung der Bodenfeuchte erfolgt für einen leichten und einen schweren Boden an neun Stationen, wobei über die Saison sieben



Abb. 6.4.4: blühende Kartoffel, Foto: F. Falke, DWD-ZAMF.



verschiedenen Kulturen betrachtet werden. In den „Hinweisen zum Einsatz der Feldberechnung“ werden Informationen über die klimatische Wasserbilanz der letzten Woche, eine Wasserbedarfs-Vorhersage der verschiedenen Kulturen für die folgende Woche und die Bodenfeuchteverläufe der letzten vier Tage mit einer Vorhersage für die nächsten fünf Tage zusammengestellt. Abbildung 6.4.6 zeigt den simulierten Bodenfeuchteverlauf aus den Berechnungshinweisen vom 2. Juni 2015. Im Modell wird von einer Beregnung ausgegangen, wenn die Grenze von 50 %nFK unterschritten wird (Markierung mit Pfeil).

Im Zuge des Klimawandels wird die Beregnung auf Trockenstandorten und in regenarmen Witterungsabschnitten immer wichtiger. Neben den bereits seit Jahren gebräuchlichen Beregnungsstrategien im Kartoffel-, Sonderkultur- und Zuckerrübenanbau richtet sich das Interesse zunehmend auch auf Getreide und Grünland.

### 6.4.2 Pflanzenkrankheiten und Schädlinge

Kartoffeln können durch verschiedene Ursachen geschädigt werden. Dazu zählen u.a. durch Pilze, Bakterien oder Viren ausgelöste Krankheiten. Schädigungen treten außerdem durch Insekten, Asseln, Fadenwürmer oder Nagetiere auf, auf die an dieser Stelle jedoch nicht eingegangen werden soll.

Die wichtigste Pilzkrankheit ist die Kartoffelfäule, auch als Kraut- und Knollenfäule bekannt (*Phytophthora infestans*,

Abb. 6.4.6: Berechnete Bodenfeuchte unter Winterweizen und Kartoffeln für den Zeitraum vom 29.5. bis 6.6.2015 (Vorhersage 2.6.-6.6.), BP30 - leichter Boden, BP40 - schwerer Boden, Modell AMBAV.

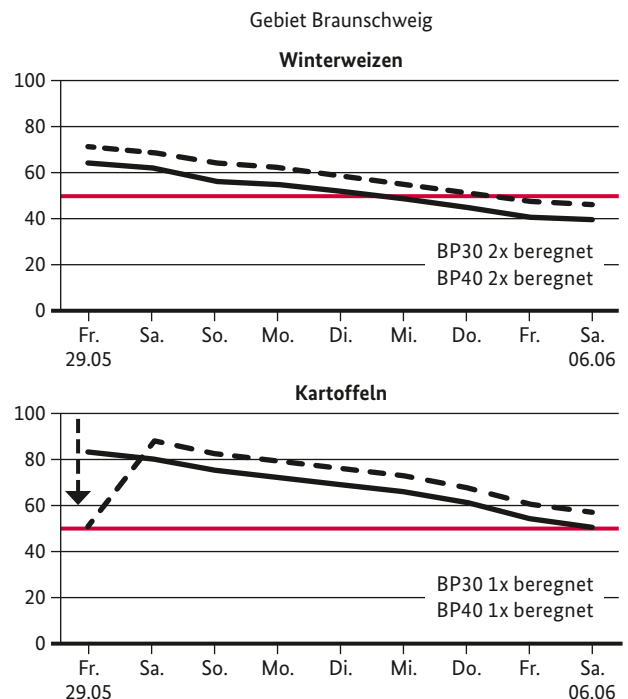




Abb. 6.4.7: Kraut- und Kollenfäule

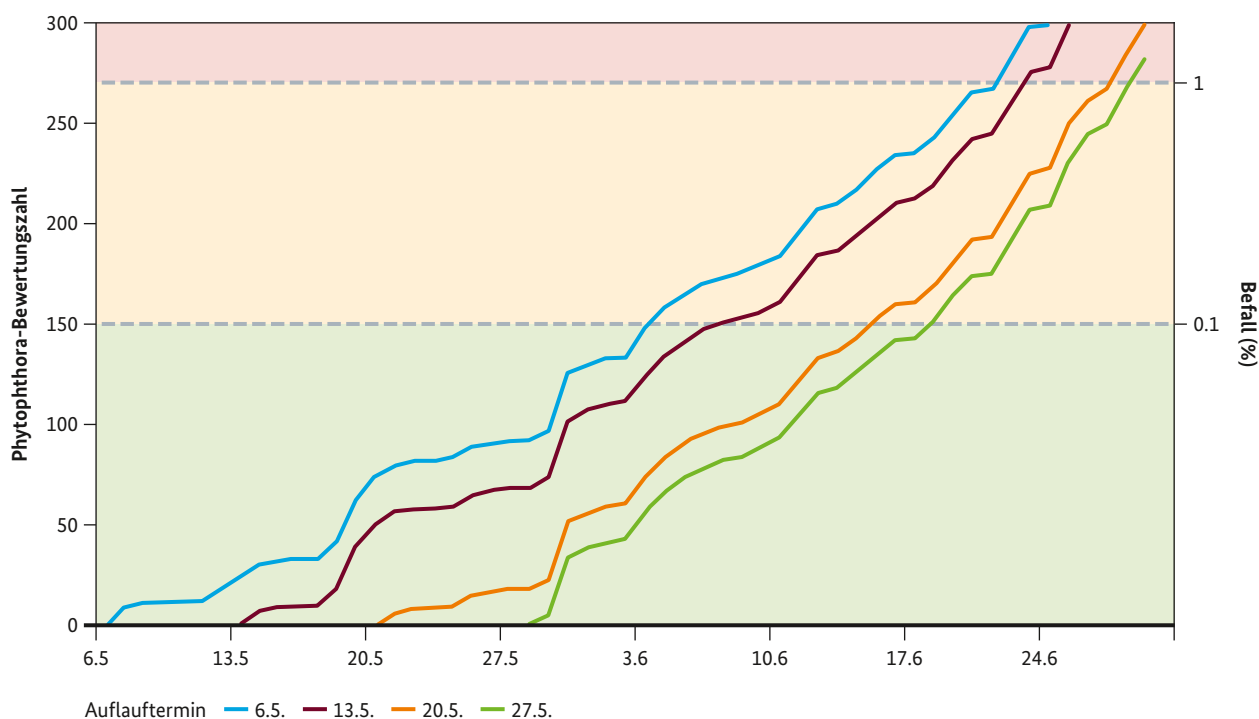
Abb. 6.4.7). Der Befall von Kartoffeln, insbesondere in feuchten Sommern (zum Teil auch im Frühling), wenn der Erreger optimale Bedingungen für die Vermehrung vorfindet, führt zu teilweise erheblichen Ertragsausfällen. Entscheidende Faktoren für die Ausbreitung sind Temperaturen über 10 °C und das Vorhandensein von flüssigem Wasser in Form von Tau oder Regen auf den Kartoffelblättern. Zur Überwachung

hat der DWD ein „Negativ-Prognosemodell“ entwickelt, welches die Infektionsbedingungen über die Temperatur und die Blattfeuchte berechnet und den Zeitpunkt ausgibt, ab wann mit einer Erstinfektion zu rechnen ist. (Deutschlandkarten und Stationsgrafiken unter Agrarmeteorologische Gefahrenhinweise auf [http://www.dwd.de/DE/fachnutzer/landwirtschaft/2\\_agrarwetter/\\_node.html](http://www.dwd.de/DE/fachnutzer/landwirtschaft/2_agrarwetter/_node.html)). Die als Eingangsgröße notwendige Blattnäse wird über das Bestandsklimamodell BEKLIMA berechnet.

Bei der Prognose werden vom Auflauftermin an Bewertungsziffern aufsummiert (Abb. 6.4.8). Unterhalb des ersten Grenzwertes von 150 sind Infektionen nicht möglich. Bei Überschreiten dieses Wertes (Ende der befallsfreien Zeit) ist eine Infektion möglich, aber bei niedrigen Werten noch unwahrscheinlich. Ab einer Bewertungsziffer von 270 müssen Bestände verstärkt überwacht bzw. vorbeugende Pflanzenschutzmaßnahmen vorgenommen werden, weil eine Infektion jederzeit möglich ist. Haben sich erste Befallsnester im Bestand gebildet, wird es schwer, den Befall zu stoppen.

Das Bestandsklima kann sogar mit Varianten wie Beregnung und Anbau unter Folien gerechnet werden. Dabei bedarf es allerdings immer eines definierten Auflauftermins, der je nach angebauter Sorte, Anbauart und Region stark schwanken kann und eine individuelle Steuerung erforderlich macht.

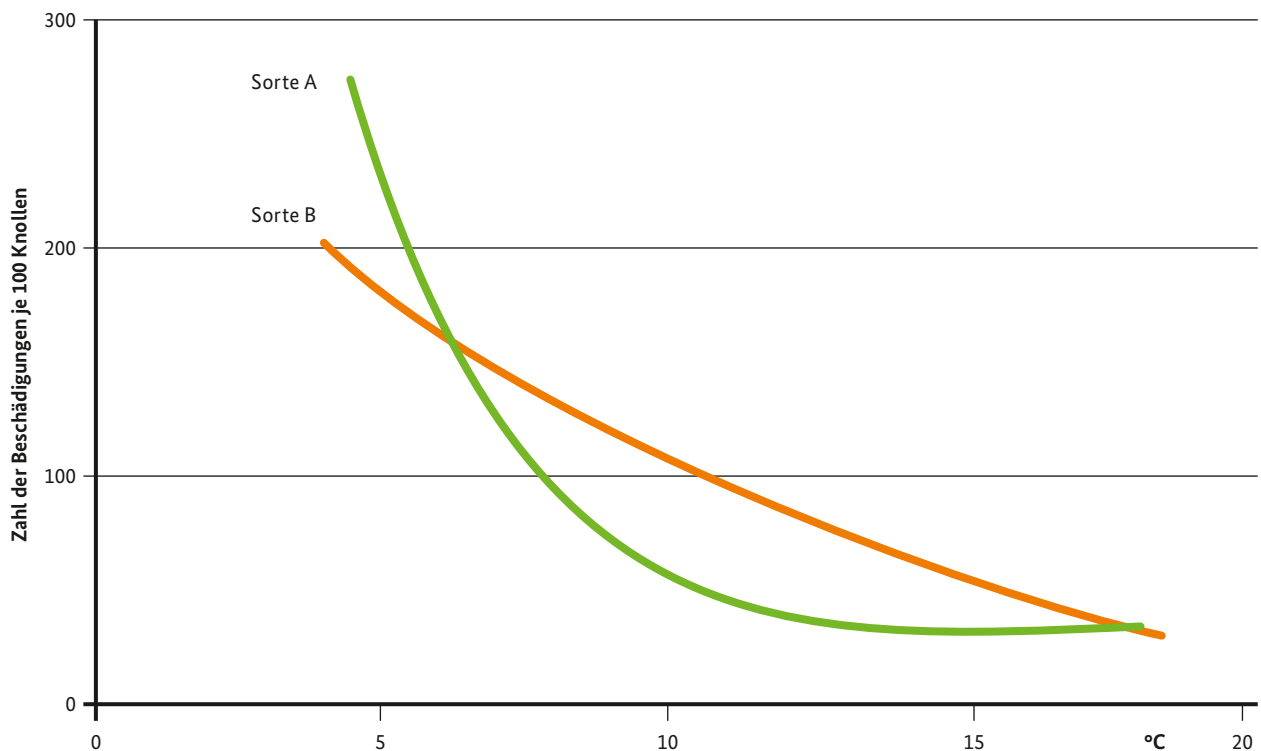
Abb. 6.4.8: Verlauf der Bewertungsziffer für verschiedene Auflauftermine 2017, Standort Braunschweig (DWD, 2017), grün: keine Infektionen, gelb: erste Infektionen möglich, rot: Pflanzenschutzmaßnahmen notwendig.



Deutscher Wetterdienst (erstellt 24.08.2017 07:27 UTC \*) UTC = MESZ-2 bzw. UTC = MEZ-1  
Kontakt: Landwirtschaft@dwd.de



Abb. 6.4.9: Einfluss der Knollentemperatur auf den Anteil beschädigter Knollen beim Roden (Faustzahlen für die Landwirtschaft, 1988)



Beim Einsatz von Kontaktfungiziden ist zu beachten, dass sie durch größere Niederschlagsmengen abgewaschen und anschließend erneuert werden müssen. Bei zu erwartenden Niederschlägen über 10 mm sollte daher eine Ausbringung nicht erfolgen.

### 6.4.3 Besonderheiten bei der Ernte

Die Ernte sollte erst nach Erreichen der Schalenfestigkeit bei trockenem Boden erfolgen. Die Bodenbedingungen zur Ernte sowie die Lagerbedingungen in den ersten Wochen nach der Einlagerung sind von entscheidender Bedeutung für das Auftreten von Lagerfäulen. Zur Vermeidung von Verletzungen sollten bei den Rodearbeiten die Bodentemperatur in 5 cm Tiefe berücksichtigt werden (siehe auch Abb. 6.4.9):

- 10 bis 20 °C: optimaler Bereich
- unter 10 °C: Die Beschädigungsneigung und die Gefahr der Blaufleckigkeit nimmt zu.

Bei den bakteriellen Kartoffelkrankheiten ist die Schwarzbeinigkeit (Kartoffelpflanze) oder Knollennassfäule (Kartoffelknolle) von großer Bedeutung. Die Erreger sind *Pectobacterium carotovorum* und *P. atrosepticum*. Die Verbreitung erfolgt durch den latenten Befall des Pflanzgutes. Niederschläge und Bewässerung bereits vor dem Auflaufen der Pflanzen erhöhen die Gefahr eines Befalls. Der Erreger kann sich bereits ab Temperaturen oberhalb von 10 °C entwickeln.

Das Temperaturoptimum liegt jedoch deutlich höher bei 25 bis 30 °C. Verluste treten gehäuft in Jahren mit einer sehr feuchten zweiten Vegetationshälfte auf.

### Literatur

Achtnich, W. (1980): Bewässerungslandbau. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.

Braden, H. (1995): The model AMBETI – A detailed description of a soil-plant-atmosphere model. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 195, 117 S.

DWD (2017): Verlauf der Phytophthora-Bewertungsziffer, Stationsgrafik Braunschweig 2017 (aufgerufen am 26.7.2017 12:30).

Faustzahlen für die Landwirtschaft (1988): 11. Auflage, Verlagsunion Agrar, S.318.

Fricke, E. (2008): Mit Beregnung das Ertragsrisiko senken; Zeitschrift TOP-Agrar Münster, 12/2008, S. 100-103.

LWK (2016): Der Ratgeber Pflanzenbau und Pflanzenschutz der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, 21. Auflage.

## 6.5 Grünland

Autoren: Antje Herrmann, Cathleen Frühauf

Die Ertragsbildung bzw. der Zuwachsverlauf eines Grünlandbestandes wird vor allem von den Bestandeseigenschaften, den Umweltverhältnissen und den Bewirtschaftungsmaßnahmen beeinflusst. Nach Vegetationsbeginn (siehe Abschnitt 6.5.1) ist der Zuwachs in Abhängigkeit von den Umweltbedingungen zunächst noch gering. Durch Umsteuerung der Gräser in die generative Entwicklung und folgendem Einsetzen des Schossens werden, in Abhängigkeit von den Temperaturverhältnissen, maximale Zuwachsraten Anfang Mai bis Anfang Juni erreicht. Danach sinken die Zuwachsraten mehr oder weniger kontinuierlich ab, wobei die Wasserversorgung und Einstrahlungsbedingungen stark modifizierend wirken können. Bei den Bestandeseigenschaften übt vor allem die Zusammensetzung, d.h. der Anteil Gräser, Kräuter und Leguminosen sowie die in den drei Gruppen dominierenden Arten, einen Einfluss auf die Höhe des Zuwachses eines Bestandes aus. Durch gezielte Bewirtschaftungsmaßnahmen, wie die Nährstoffversorgung und die Nutzungsfrequenz, können die Zuwachsraten variiert werden. Das generelle Muster des Zuwachsverlaufs kann jedoch nicht vollständig geändert werden.

Die Ertragsbildung einzelner Aufwüchse kann über eine logistische (s-förmige) Funktion beschrieben werden. Eine geringe Blattfläche und ein auf Reserven basierendes Wachstum bedingen zunächst geringe Zuwachsraten (Abb. 6.5.1). Eine kontinuierliche Zunahme der Blattfläche und damit der Assimilatversorgung resultiert in einer Phase eines nahezu linearen Zuwachses. Zunehmende Beschattung und

Alterung führen zu einer Abnahme der Zuwachsraten. Mit Fortschreiten der Vegetationsperiode sinken die Zuwachsraten im Allgemeinen, d.h. die Zuwachskurven werden flacher und die Dauer zum Erreichen einer Ziel-Aufwuchsmenge wird länger.

Stellt die Aufwuchsmenge das primäre Kriterium für die Ernteterminierung dar, muss die Nutzung möglichst spät innerhalb eines Aufwuchses erfolgen, um den maximalen Ertragszuwachs abschöpfen zu können. Im Hinblick auf die Versorgung der Wiederkäuer mit Energie, Nährstoffen und Struktur muss jedoch auch die Dynamik der Futterqualität bei der Erntezeitterminierung in Betracht gezogen werden. Prinzipiell eilt die Nährstoffaufnahme der Ertragsbildung voraus, d.h. junges Pflanzenmaterial weist eine höhere Nährstoffkonzentration und einen geringeren Anteil lignifizierter Zellwand auf als älteres Material. Darüber hinaus trägt die alterungsbedingte Veränderung der Morphologie (Blatt/Stängel-Verhältnis) zu einer zusätzlichen Variation der Inhaltsstoffzusammensetzung und Futterqualität bei. Somit weist der erste, meist generative Aufwuchs ein geringeres Blatt/Stängel-Verhältnis auf als die nachfolgenden Aufwüchse und ist durch eine intensivere Dynamik der Futterqualitätsveränderungen charakterisiert. In intensiv schnittgenutzten Beständen ermöglicht eine Nutzung kurz vor oder zu Beginn des Ährenschiebens eine hohe Ertragsleistung bei gleichzeitig hoher Futterqualität. Bestände mit einem hohen Anteil Kräuter oder Leguminosen weisen generell eine langsamere Abnahme der Futterqualität, d.h. eine höhere Nutzungselastizität, auf als gräserreiche Bestände. Die Nährstoffversorgung wirkt direkt und indirekt, über die Bestandeszusammensetzung, auf die Futterqualität. Hohe N-Gaben führen beispielsweise zu gesteigerten Proteingehalten, während die Gehalte an Nichtstruktur-Kohlenhydraten abnehmen.

Abb. 6.5.1: Typische Zuwachsverläufe der Trockenmasse (TM) eines intensiv genutzten Dauergrünlandbestandes (nach Berendonk, 2011).

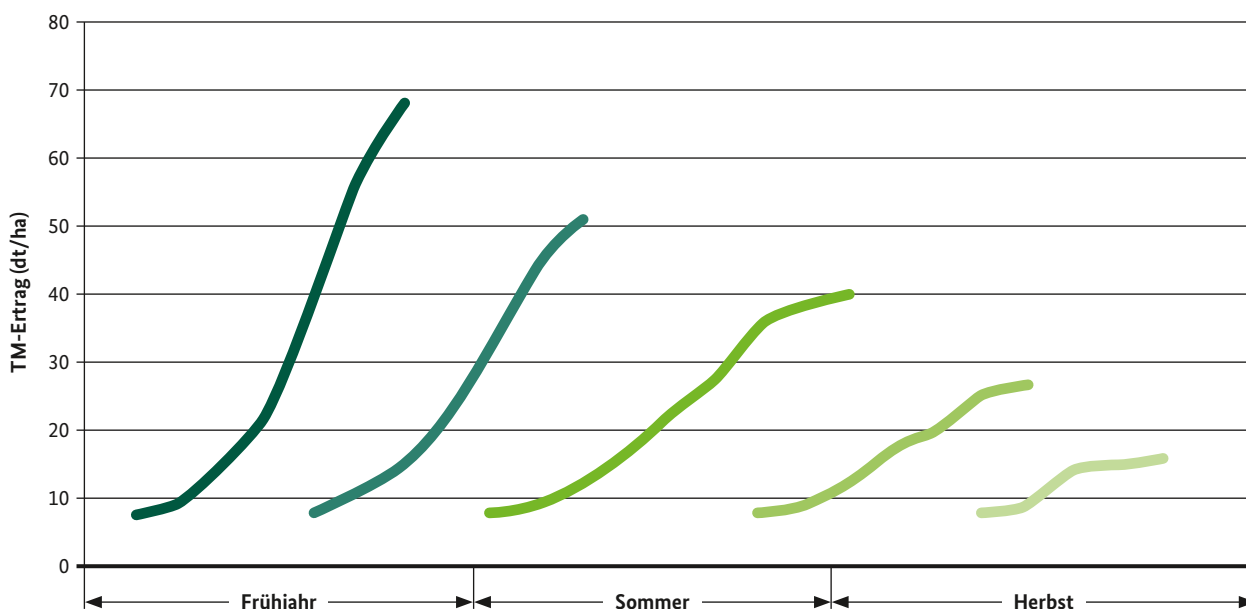




Abb. 6.5.2: Phänologisches Stadium „Ergrünen“, Weidelgrasbestand Braunschweig, Foto: F. Falke, DWD-ZAMF.

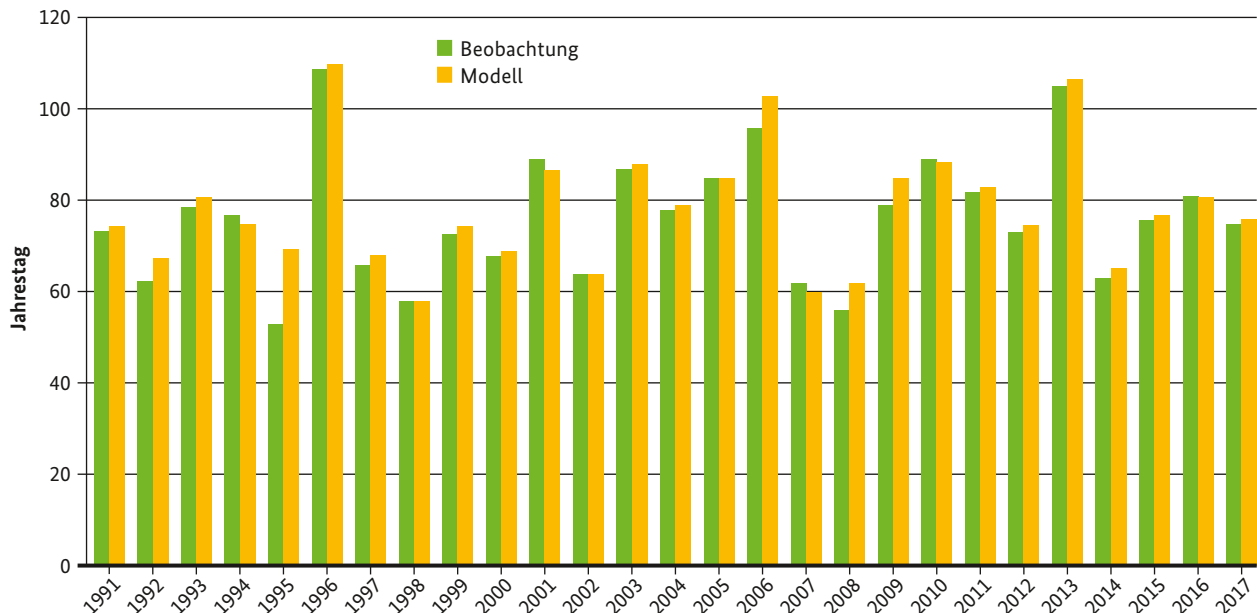
### 6.5.1 Vegetationsbeginn

Die Nährstoffversorgung von Grünlandbeständen sollte im Sinne des Gewässer- und Klimaschutzes hinsichtlich Menge und Terminierung so erfolgen, dass die Nährstoffe während der Vegetationszeit weitestgehend aufgenommen werden können. Daraus folgt, dass der Düngungstermin im Frühjahr möglichst nahe am Vegetationsbeginn liegen sollte, um die Auswaschung von Nährstoffen, insbesondere von Stickstoff, zu vermeiden.

Für nordwestdeutsche Umweltbedingungen wurde ein Temperatursummenmodell zur Prognose des Vegetationsbeginns von Dauergrünland entwickelt (Ernst und Loeper,

1976), welches in der Agrarmeteorologie für den gemäßigten Klimaraum Verwendung findet. Hierbei erfolgt die Aufsummierung der Tagesmitteltemperaturen über 0 °C ab dem 1. Januar, wobei die Temperaturen aus den Monaten Januar und Februar mit einer geringeren Wichtung (Faktor 0,5 bzw. 0,75) in die Berechnung eingehen (korrigierte Temperatursumme). Der Vegetationsbeginn wird bei Erreichen einer Summe von 200 Gradtagen angenommen. Der so ermittelte Termin stimmt gut mit der phänologischen Beobachtung des „Ergrüens“ von Grünlandbeständen überein (Abb. 6.5.2). Abbildung 6.5.3 zeigt den Vergleich zwischen beobachteten und modellierten Eintrittsterminen. Nur in einzelnen Jahren weicht der mit dem Modell ermittelte Wert stärker von der Beobachtung ab, wobei es sich meist um besonders strahlungsreiche Frühjahre handelt.

Abb. 6.5.3: Vergleich der beobachteten und berechneten Eintrittstermine des phänologischen Stadiums „Ergrünen“ von Grünland für den Zeitraum 1991-2017, Standort Braunschweig.



Das Beratungsmodul Grünlandtemperatursumme steht für verschiedene Bundesländer über das Informationssystem Integrierte Pflanzenproduktion (ISIP, [www.isip.de](http://www.isip.de)) zur Verfügung, bzw. wird über die Homepage entsprechender Länderdienststellen bereitgestellt. Auch in anderen Ländern wird die Temperatursumme als Instrument in der Grünlandberatung eingesetzt – in Frankreich beispielsweise wird der Weideauftrieb im Frühjahr darüber prognostiziert. Der Berechnungsmodus weicht allerdings etwas von der in Deutschland entwickelten Temperatursumme Grünland ab.

### 6.5.2 Ertragsbildung und Qualitätsentwicklung

Im Gegensatz zu einjährigen Ackerkulturen, die in Reinkultur angebaut werden, bestehen Grünlandbestände meist aus unterschiedlichen Arten und Sorten, die mehrmals im Jahr über Schnitt und/oder Weide sowie über mehrere Jahre (Ackergras < 5 Jahre, Dauergrünland > 5 Jahre) genutzt werden. Darüber hinaus variiert die Bestandeszusammensetzung in Abhängigkeit von Bewirtschaftungsintensität, Pflegemaßnahmen und Witterung. Die Vielzahl von Faktoren, welche die Ertragsbildung und Qualitätsdynamik von Grünlandbeständen beeinflussen, mag erklären, warum nur sehr wenige der in der Literatur beschriebenen Modelle in der Praxis zum Einsatz kommen.

In Deutschland wurde mit Einführung der Milchquote im Jahr 1984 und der dadurch gestiegenen Bedeutung der

Grundfutterqualität die „Reifeprüfung Grünland 1. Schnitt“ in Nordwestdeutschland (Regionen der heutigen Landwirtschaftskammern Niedersachsen und Schleswig-Holstein) etabliert. Sie dient zur Entscheidungsunterstützung bei der Schnittzeitterminierung. Der Schnittzeitpunkt ist aufgrund der schneller ablaufenden Alterungsprozesse in generativen Aufwüchsen besonders im ersten Aufwuchs von Bedeutung. Silagen für die Milcherzeugung und Rindermast sollten einen Rohfasergehalt von 23 % nicht überschreiten und eine Energiekonzentration von mindestens 6,4 MJ NEL/(kg TM) aufweisen (Abb. 6.5.4).

Die „Reifeprüfung Grünland 1. Schnitt“ umfasst zum einen wöchentliche Probenahmen auf repräsentativen Dauergrünland- und Ackergrasflächen in unterschiedlichen Klimaräumen Niedersachsens und Schleswig-Holsteins (Abb. 6.5.5a, b) zur Ermittlung definierter Ertrags- und Qualitätskenngrößen. Neben dem Ist-Zustand werden der TM-Ertrag sowie verschiedene Qualitätskenngrößen (Rohproteingehalt, Rohfasergehalt, Energiekonzentration) über einen einwöchigen Zeitraum prognostiziert. Diese Berechnungen erfolgen routinemäßig beim DWD und basieren auf dem witterungsgesteuerten Grünlandmodell *FOPROQ* (Forage Production Quality), welches am Institut für Pflanzenbau und -züchtung der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel entwickelt wurde (Kornher et al., 1991; Herrmann et al., 2005). Die Veröffentlichung der Ertrags- und Qualitätskenngrößen erfolgt 2-3 Tage nach Probenahme und Modellrechnung in der landwirtschaftlichen Fachpresse sowie auf den Homepages der betreffenden Landwirtschaftskammern (Tab. 6.5.1). Aufgrund der



Abb. 6.5.4: Weidelgrasbestand kurz vor dem Schnitt, Braunschweig, Foto: F. Falke, DWD-ZAMF.

Abb. 6.5.5a: Klimaregionen und Standorte für die in Schleswig-Holstein durchgeführte Reifeprüfung Grünland (Thaysen, 2016).

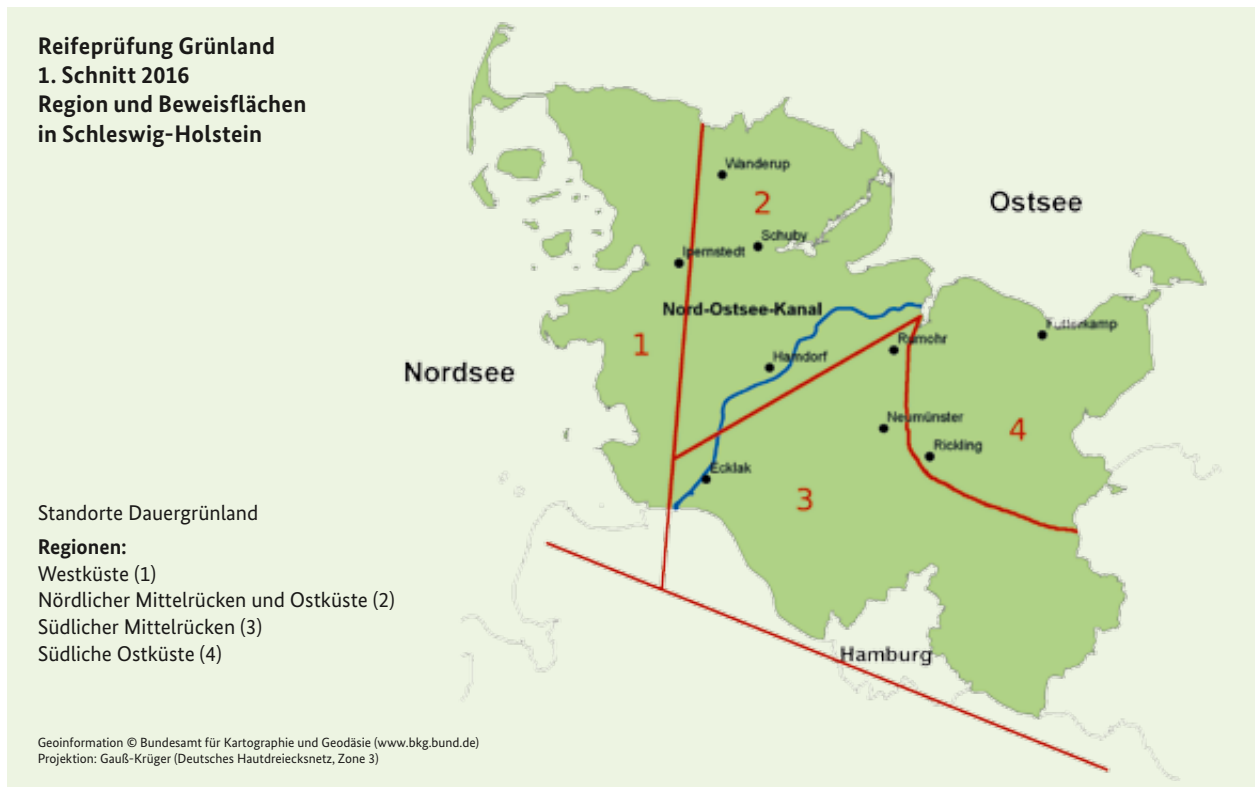
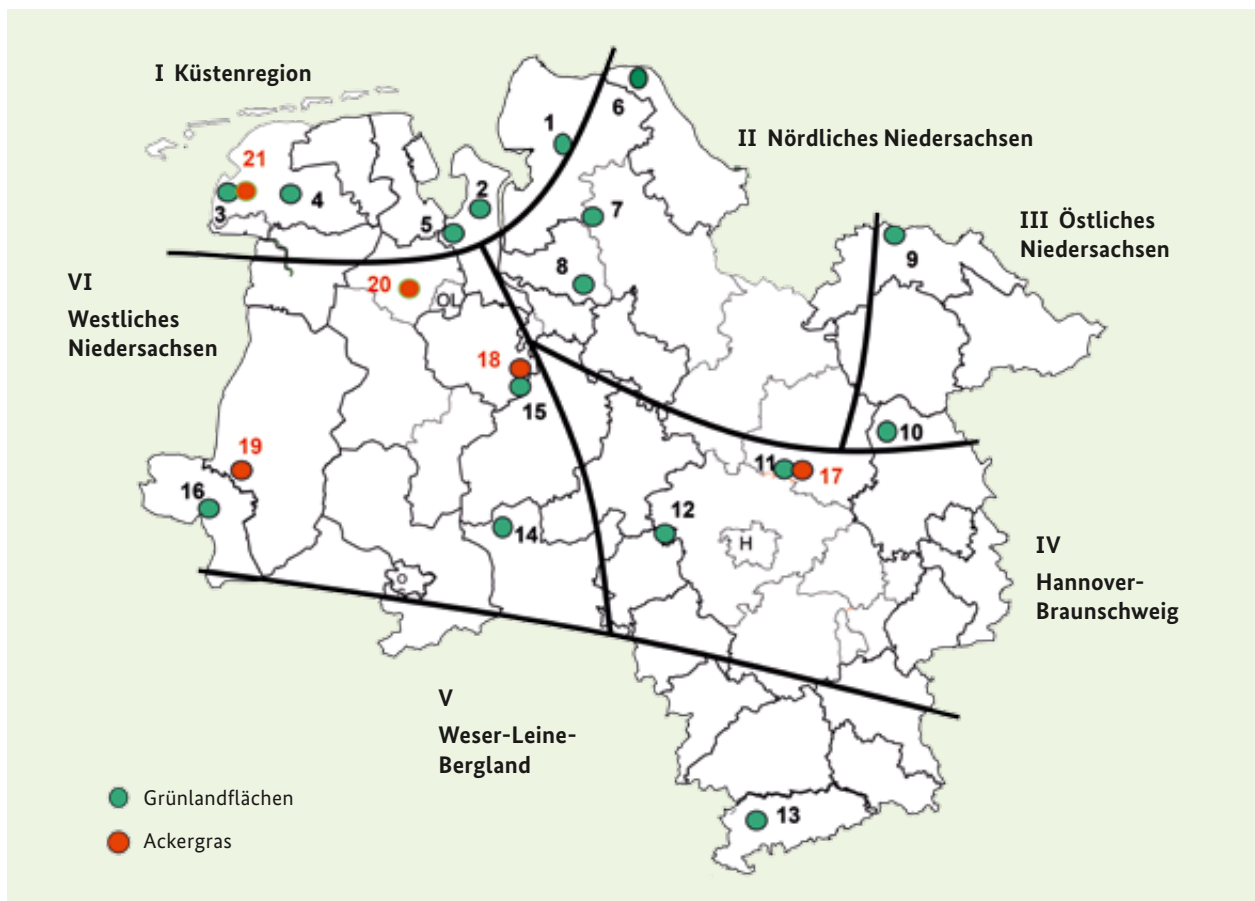


Abb. 6.5.5b: Klimaregionen und Standorte für die Reifeprüfung Ackergras und Grünland in Niedersachsen (Lange und Benke, 2016).



**Tab. 6.5.1: Exemplarische Darstellung der Ergebnisse von Probenahmen und Prognosen für verschiedene Standorte in Schleswig-Holstein (LKSH, 2016).**

Standort	Ipersted	Wanderup	Hamdorf II	Ecklak	Rumohr	Durchschnitt
Region	1	2	2	3	3	
Fläche	Femhau 1	Kurze Ackern	Königsmoor	Struve	Grasteich	
Narbe	Altnarbe, DW betont	Altnarbe, DW betont	Altnarbe	Altnarbe, DW betont	Altnarbe	
Ansaatdatum						
<b>Werte am 28.04.2016</b>						
FM-Ertrag dt/ha	42	32	18	91	54	47
TM%	16.4	20.4	24.0	15.6	16.3	18.5
TM-Ertrag dt/ha	7	7	4	14	9	8
Rohfaser %TM	13.9	13.4	15.9	16.1	16.0	15.1
Rohprotein %TM	27.1	19.2	20.9	19.8	22.9	22.0
Zucker %TM	22.8	28.5	24.8	21.6	23.4	24.2
NEL MJ/kg TM	8.2	7.7	7.6	7.6	7.9	7.8
Milchsäurebakterienbesatz						
<b>Prognose: 07.05.2016</b>						
TM-Ertrag dt/ha	23	19	17	29	23	22
Rohfaser %TM	16.1	15.4	17.9	18.1	18.0	17.1
Rohprotein %TM	22.6	14.7	16.4	15.3	18.4	17.5
NEL MJ/kg TM	7.8	7.3	7.2	7.2	7.5	7.4
Schnitt ab:						

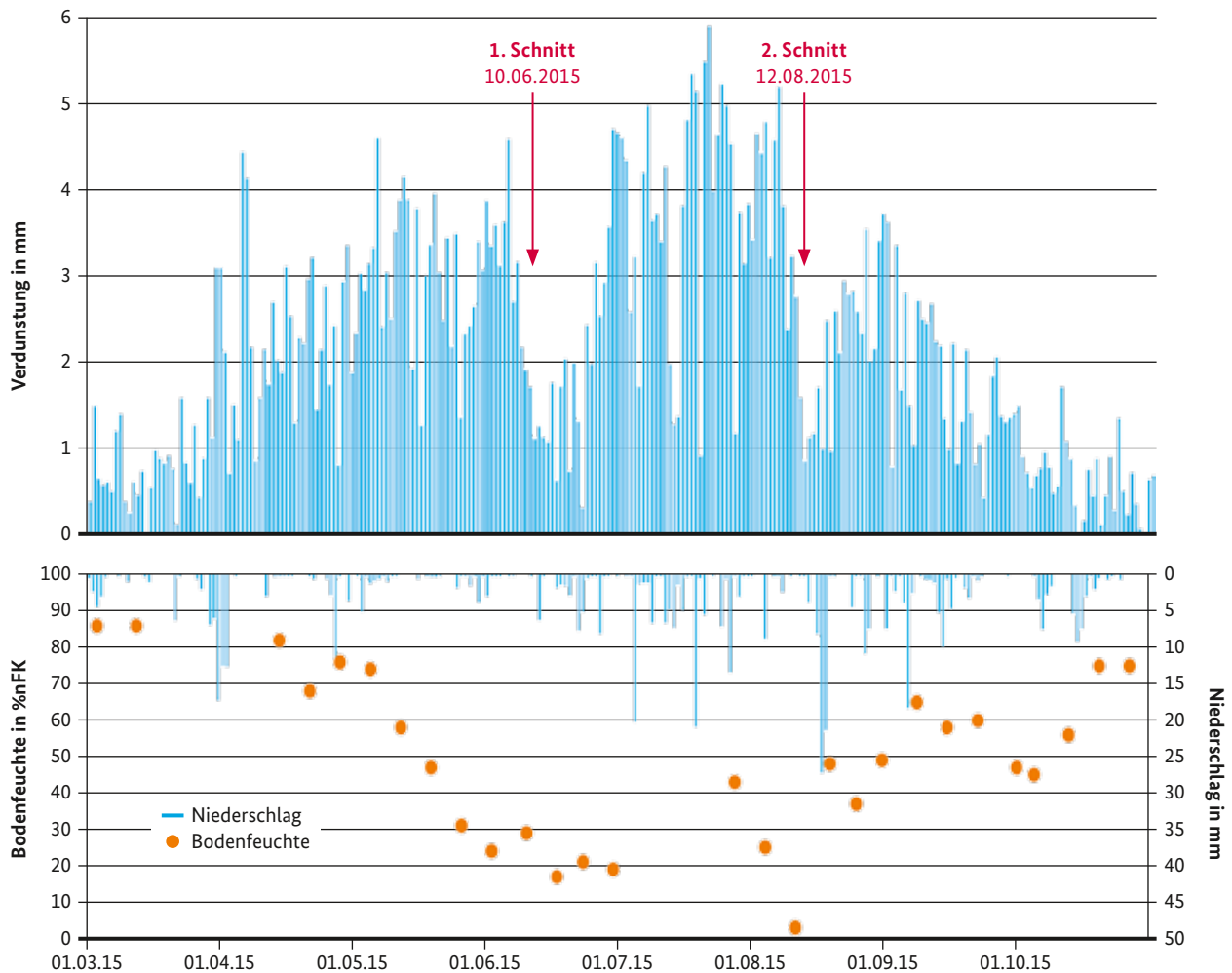
validen Modellprognosen wurde die Anzahl der Flächen, auf denen Proben genommen werden, im Laufe der letzten Jahre sukzessive reduziert. Für Prognosen von Nachwüchsen ist das Modell prinzipiell ebenfalls geeignet, eine Umsetzung in ein Beratungstool ist aber aufgrund des in der Praxis stark variierenden Managements (Schnitt/Weide, Nutzungsfrequenz) bislang nicht erfolgt.

Das Modell *FOPROQ* umfasst ein Ertrags- und ein Qualitätsmodul, wobei ersteres den täglichen TM-Zuwachs über die vorhandene Biomasse und eine relative Wachstumsrate berechnet. Der tägliche Zuwachs wird modifiziert über einen Index, der den Einfluss der Bestandesalterung beschreibt, und einen weiteren Index, der den Einfluss von Temperatur, Strahlung und pflanzenverfügbarem Bodenwasser zusammenfasst. Einen sehr großen Einfluss auf die Ertragsbildung hat das pflanzenverfügbare Bodenwasser. Bei grundwasserfernen Standorten ist deshalb die Kenntnis des Wasserhaushaltes eines Grünlandbestandes von Bedeutung. Abbildung 6.5.6 zeigt die mithilfe eines Lysimeters am Standort Braunschweig ermittelten täglichen Verdunstungsraten eines Weidelgrasbestandes. Je nach herrschenden meteorologischen Bedingungen und Bodenwasserverfügbarkeit

werden in der Hauptwachstumszeit Werte zwischen 1 und 5 mm erreicht. Messungen dieser Art dienen zur Verifizierung der kulturabhängigen Wasserhaushalts-Modellierung des Modells AMBAV.

Das Qualitätsmodell beruht auf der Annahme, dass sich die Futterqualität graduell im Vegetationsverlauf verändert. Die tägliche, auf den Einfluss von Umweltfaktoren beruhende Veränderung der Futterqualität wird berechnet über Umweltveränderungsraten für Temperatur, Tageslänge, Einstrahlung und pflanzenverfügbares Bodenwasser. Durch Multiplikation erhält man die tägliche Gesamt-Umweltveränderungsrate, die über die Zeit akkumuliert wird, und mittels einer Schwellenwert-Response-Funktion zu einer bestimmten Futterqualitätskenngröße in Beziehung gesetzt wird. Der Einfluss der Umweltbedingungen auf den optimalen Schnittzeitpunkt des ersten Aufwuchses wird aus Abbildung 6.5.7 ersichtlich. Für den Klimazeitraum 2020-2050 weisen Simulationen eine Vorverlegung des optimalen Schnittzeitpunktes für viele Regionen Norddeutschlands aus, die primär auf den Temperaturanstieg zurückzuführen ist. Als Kriterium für den optimalen Erntetermin wurde ein Rohfasergehalt von 23 % angenommen. Für die Simulation

Abb. 6.5.6: Tägliche Verdunstungsraten (oben) und gravimetrisch bestimmte Bodenfeuchte (unten) eines Weidelgrasbestandes, DWD Lysimeterstandort Braunschweig, 2015.



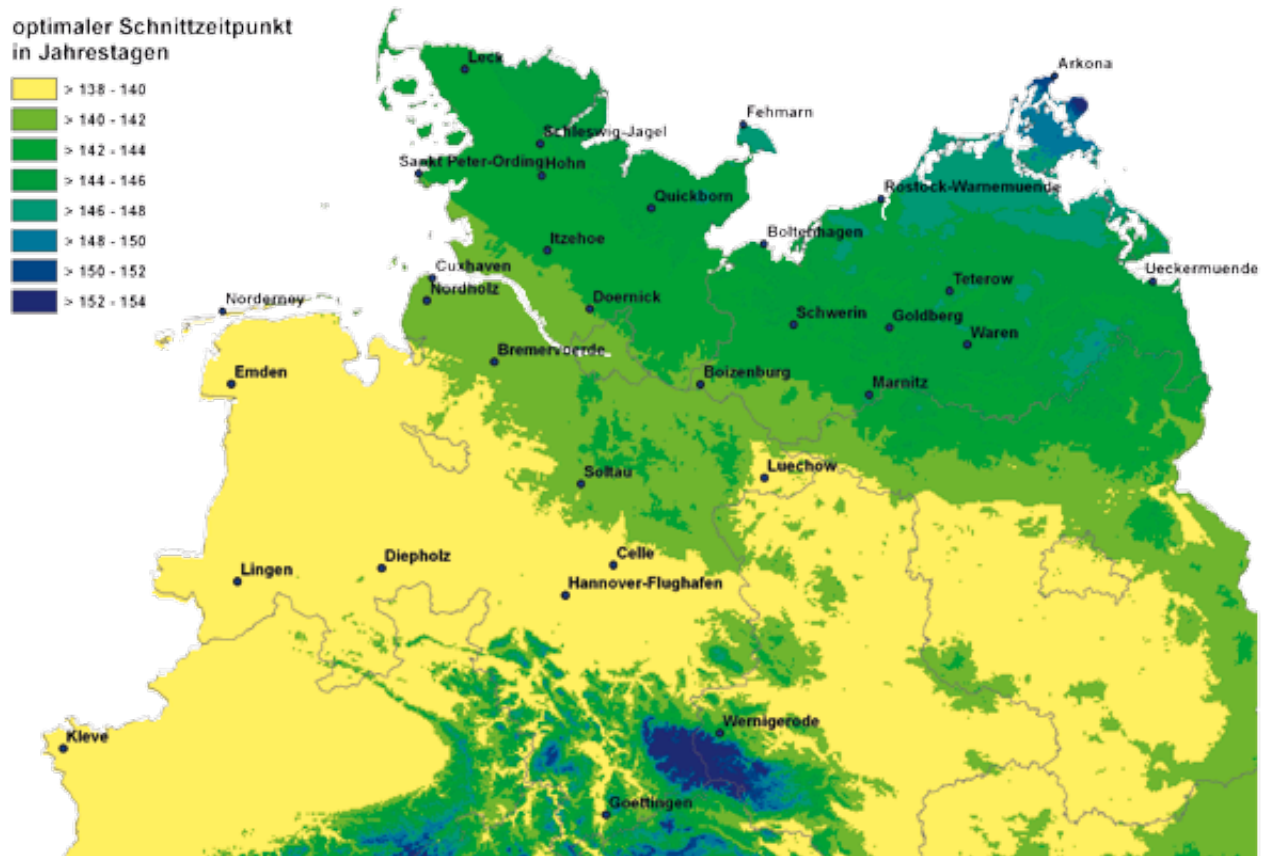
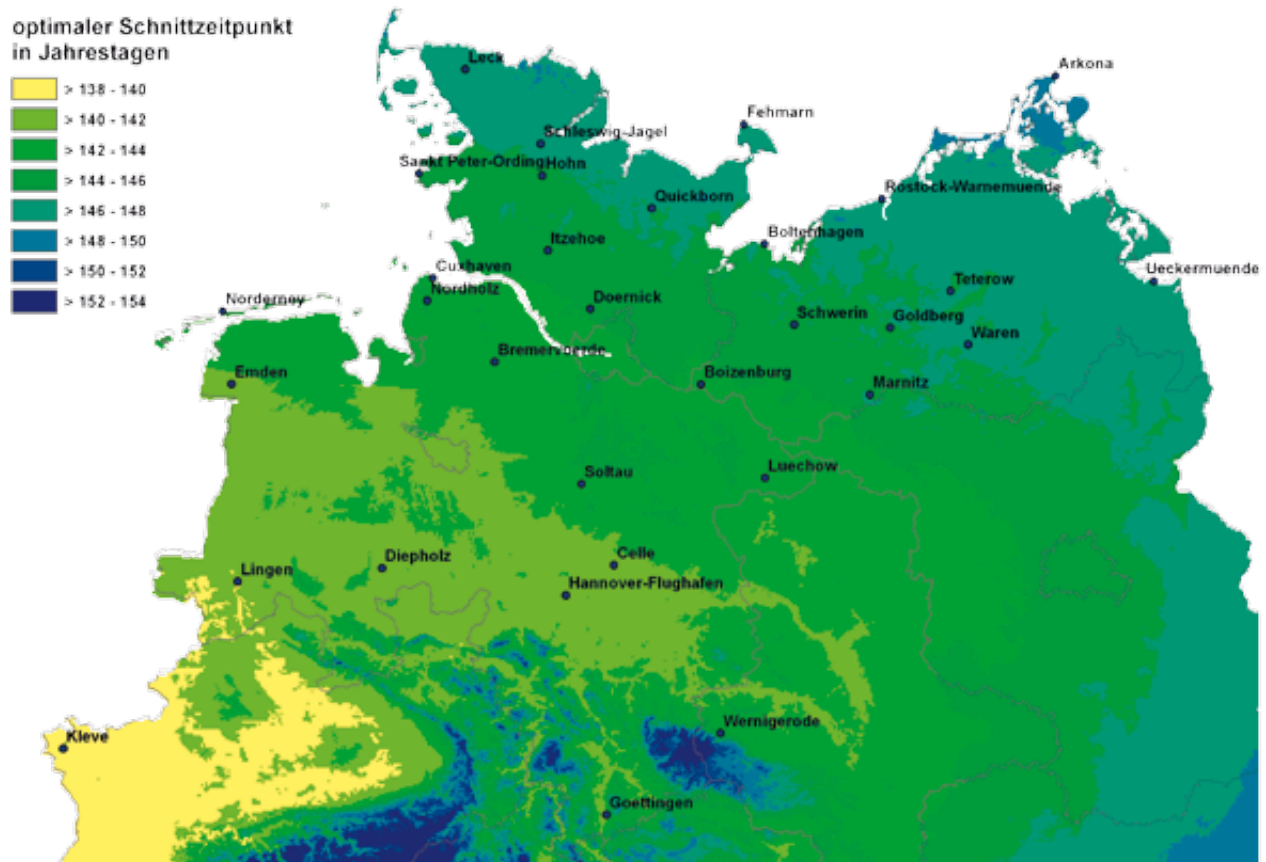
des Gehaltes an wasserlöslichen Kohlenhydraten, der für die Siliereignung (Vergärbarkeit) von großer Bedeutung ist, wurde ein weiteres Qualitätsmodul entwickelt (Wulfes et al., 1999), welches aber noch nicht in der Reifeprüfung Grünland zum Einsatz kommt.

Basierend auf Zuwacherhebungen, Messungen der entsprechenden Qualitätsveränderungen und den zugehörigen Witterungsdaten werden bestandes- und managementspezifische Parameter des Ertrags- bzw. Qualitätsmoduls für verschiedene Grünlandbestände und -aufwüchse kalibriert. Im Sinne von belastbaren Prognosen sollte die Datenbasis eine möglichst große Anzahl verschiedener Umwelten umfassen. Extrapolationen auf Regionen, Bestandeszusammensetzungen bzw. Nutzungsintensitäten, die von dem Kalibrationsdatensatz stark differieren, sind nur bedingt möglich. Flächendeckende Grünlandertragsschätzungen werden bislang dadurch erschwert, dass keine Informationen zu Schnitthäufigkeiten und Schnittterminen vorliegen. Ziel eines aktuellen Kooperationsprojekts der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) und dem Institut für Pflanzenbau und -züchtung der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel ist es daher, mittels satellitengestützter Detek-

tion der Schnitttermine auf Einzelschlagebene in Kombination mit dem Modell *FOPROQ* künftig Grünlanderträge und Futterqualitäten flächendeckend und kostensparend erfassen zu können. Dies hat zum einen Relevanz für die Optimierung von Managementmaßnahmen, zum anderen unterstützen flächendeckende Daten die Entwicklung und Bewertung von agrarpolitischen Maßnahmen und Instrumenten.

Für schnittgenutzte Dauergrünlandflächen in Südtirol wurde eine Web-Applikation (webGRAS) zur online-Schätzung der potenziellen Futterqualität des ersten Aufwuchses entwickelt (Peratoner et al., 2015; <http://www.laimburg.it/de/berglandwirtschaft/1903.asp>). Über flächendeckend verfügbare Wetterdaten sowie weitere Informationen (Standort, Datum des Weidestadiums, Erntedatum, Düngung und Nutzungshäufigkeit etc.), welche der Nutzer bereitstellen muss, wird eine Reihe von Futterqualitätsparametern geschätzt. Der Web-Applikation liegt eine umfangreiche Datenerhebung auf 35 Standorten über 11 Jahre zugrunde, auf deren Basis ein statistisches Modell entwickelt wurde.

Abb. 6.5.7: Optimaler Schnittzeitpunkt für den ersten Aufwuchs in Tagen nach dem ersten Januar im Vergleich der Klimazeiträume 2000-2015 (oben) und 2020-2050 (unten; Remo, Emissionsszenario A1B), regionalisiert für Norddeutschland.





### 6.5.3 Welkevorgang

Über pflanzenbauliche Maßnahmen wie Nutzungsintensität, Nährstoffversorgung sowie die Bestandeszusammensetzung können der Ertrag und die Futterqualität von Grünlandbeständen beeinflusst werden. Der überwiegende Teil des von Grünlandflächen stammenden Grundfutters wird nicht frisch verfüttert oder durch Weidegang genutzt, sondern in Form von Silage oder in geringerem Umfang als Heu konserviert. Hierbei muss durch optimierte Verfahren sichergestellt werden, dass die Futterqualität weitgehend erhalten bleibt. Ein entscheidender Aspekt sowohl bei der Silage- als auch Heubereitung ist ein rasches Anwelken des Grünmaterials auf den entsprechenden Ziel-Trockensubstanz(TS)-Gehalt. Dadurch werden negative Qualitätsveränderungen wie ein Verlust wasserlöslicher Kohlenhydrate oder der Proteinabbau eingeschränkt. Der TS-Gehalt von Heu sollte mindestens 86 % betragen, damit mikrobielle Umsetzungsprozesse und eine Erwärmung unterbunden werden und das Heu lagerfähig ist. Für die Grassilagebereitung wird ein TS-Gehalt des Siliergutes von 30-40 % angestrebt. Zu geringe TS-Gehalte resultieren in einem höheren Risiko von Buttersäuregärung und Gärstoffbildung, während überhöhte TS-Gehalte die Verdichtung im Silostock erschweren, den Gärverlauf beeinträchtigen und zu Nacherwärmung führen können.

Das agrarmeteorologische Modellpaket AMBER (Agrarmeteorologische Beratung) des Deutschen Wetterdienstes stellt ein Modul („Heutrocknung“) für die mehrtägige Prognose des Anwelkens zur Verfügung. Das Modul basiert auf einem in den Niederlanden entwickelten Modell (Atzema, 1992). Als Modellinput werden neben Wetterdaten in stündlicher Auflösung (Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Globalstrahlung, Niederschlag, Windgeschwindigkeit, langwellige Gegenstrahlung) Angaben zur Nutzung (Tag und Datum des Schnittes, Anzahl Zettvorgänge) benötigt. Im Modell wird das geschnittene Grünmaterial in eine obere und eine untere Schicht differenziert und es wird angenommen, dass das Pflanzenmaterial aus Trockenmasse, sowie absorbiertem und freiem Wasser besteht. In stündlichen Schritten werden Evaporation (Verdunstung freien Wassers), Transpiration/Desorption (Verdunstung absorbierten Wassers), Kondensation (Aufnahme freien Wassers aus der Atmosphäre) und Absorption (Transfer freien Wassers zu absorbiertem Wasser) für die obere Schicht berechnet. Die Aufnahme von Niederschlag und eventuell überschüssiger Kondensation kann auch in der unteren Schicht auftreten, falls die Aufnahmekapazität der oberen Schicht erschöpft ist. Wird das Pflanzenmaterial gezettet (gewendet), so wird eine vollständige Durchmischung unterstellt und ein mittlerer Feuchtegehalt für beide Schichten nach dem Zetten angenommen. Darüber hinaus kann der Bedeckungsgrad neu fixiert werden.

Parallel zu den Arbeiten in den Niederlanden, wurde in der ehemaligen DDR ein empirisches Modell zur Prognose des Abwelkens (Mahd bis Silieren) von Grünlandaufwüchsen entwickelt (Rübensam und Bockholdt, 1987; Thöns et al., 1989), basierend auf einer umfangreichen mehrjährigen

Datenbasis. Das Modell beschreibt die Zeitdauer bis zum Erreichen eines Ziel-TS-Gehaltes. Als Eingangsgrößen fließen Datum und Uhrzeit der Mahd, der Bestandestyp (gräserdominiertes Dauergrünland, Leguminosengras, Ackergras), das Entwicklungsstadium (vor, im bzw. nach Blütenstandsschieben des 1. Aufwuchses, Nachwüchse), der Grünlandertrag (Massebelag), der mittlere TS-Gehalt des Mähgutes (geschätzt aus Tabellenwerten), die Mähbreite und Ablagebreite, Bodenbedingungen (feucht, trocken), die Art der Schwadbehandlung (keine, Zetten, Aufbereitung, Zetten und Aufbereitung), der Ziel-TS-Gehalt, sowie die tägliche potentielle Evapotranspiration, Niederschlagsmenge und -zeitpunkt in das Modell ein. Das Modell kalkuliert den TS-Gehalt in minutlichen Zeitschritten, wobei in der aktuellen Modellversion angenommen wird, dass Wasserabgabe aus dem Mähgut nur zwischen 9 und 19 Uhr stattfindet. Das Modell wird aktuell unter norddeutschen Praxisbedingungen validiert (Pickert et al., 2016) und weiter entwickelt und soll in Kooperation mit dem DWD der Praxis zur Verfügung gestellt werden.

### 6.5.4 Ausblick

Der Fokus der vorgestellten Modelle für den Bereich Grünland liegt auf vorwiegend schnittgenutzten Beständen. Bedingt durch agrarpolitische Rahmenbedingungen und Strukturveränderungen in der Landwirtschaft hat der Anteil schnittgenutzten Grünlandes in den letzten Jahrzehnten zugenommen, während Weidegang rückläufig ist. Angesichts der aktuellen Entwicklungen auf dem Milchmarkt und der Diskussionen in Bezug auf Tierwohl und einer klimaefizienten Milchproduktion wird Weidehaltung als Alternative für konventionelle Milchviehbetriebe diskutiert. Ein entsprechendes Modell zur Beschreibung der Ertragsbildung und Qualitätsdynamik von intensiv genutzten Weideflächen ist am Institut für Pflanzenbau und -züchtung der der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel in Entwicklung.

### Literatur

Atzema, A.J. (1992): A model for the drying of grass with realtime weather data. *Journal of Agricultural Engineering Research* 53, 231-247.

Berendonk, C. (2011): Standortgerechte Weide- und Mähweidenutzung des Dauergrünlands. [https://www.landwirtschaftskammer.de/riswick/versuche/pflanzenbau/gruenland/veroeffentlichungen/standortgerechte\\_weide-\\_und\\_maehweidenutzung.htm](https://www.landwirtschaftskammer.de/riswick/versuche/pflanzenbau/gruenland/veroeffentlichungen/standortgerechte_weide-_und_maehweidenutzung.htm).

Ernst, P., Loeper, E.-G. (1976): Temperaturentwicklung und Vegetationsbeginn auf dem Grünland. *Das wirtschaftseigene Futter* 22, 5-12.

Herrmann, A., Kelm, M., Kornher, A., Taube, F. (2005): Performance of grassland under different cutting regimes as

affected by sward composition, nitrogen input, soil conditions and weather – a simulation study using the FOPROQ model. *European Journal of Agronomy* 22, 141-158.

Kornher, A., Nyman, P., Taube, F. (1991): Ein Computermodell zur Berechnung der Qualität und Qualitätsveränderung von gräserdominierten Grünlandaufwüchsen aus Witterungsdaten. *Das wirtschaftseigene Futter* 37, 232-248.

Lange G., Benke M. (2016): Grünlandreifepfung 2016 - Kälteeinbruch verzögert das Wachstum. <https://www.lwk-niedersachsen.de/index.cfm/portal/pflanze/nav/278/article/29472.html>.

LKSH (2016): Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein – 1. Mitteilung Reifepfung Grünland 1. Schnitt 2016.

Peratoner, G., Romano, G., Schaumberger, A., Piepho, H.P., Bodner, A., Florian, C., Figl, U. (2015): webGRAS: Eine Web-Applikation zur Schätzung der potenziellen Futterqualität vom ersten Aufwuchs der Südtiroler Dauerwiesen. 59. Jahrestagung der Arbeitsgemeinschaft Grünland und Futterbau, 27.-29. August 2015, Aulendorf, <http://www.lfl.bayern.de/ipz/gruenland/041598/index.php>.

Pickert, J., Hoffmann, T., Herrmann, A., Thaysen, J., Weise, G., Wellenbrock, K.-H. (2016): ‚WiltExpert‘ – a model for on-farm prediction of grass wilting time from mowing to ensiling dry matter content. *Grassland Science in Europe* 21, 200-202; <http://www.europeangrassland.org/printed-matter/proceedings.html>.

Rübensam, A., Bockholdt, K. (1987): Weiterentwicklung der Welksilageproduktion durch Breitablage – Breitaufnahme und prozeßoptimierte Organisation. Promotionsarbeit. Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR, Berlin, 302 pp.

Thaysen, J. (2016): Dauergrünland – Reifepfung. <http://www.lksh.de/landwirtschaft/pflanze/gruenland-und-ackerfutterbau/dauergruenland/>.

Thöns, H., Rübensam, A., Pickert, J. (1989): Computer-aided prediction of the wilting period of fodder crops. *International Grassland Congress*, 4 - 11 Oct. 1989, Nice, France, Vol. 2, 967-968.

Wulfes, R., Nyman, P., Kornher, A. (1999): Modelling non-structural carbohydrates in forage grasses with weather data. *Agricultural Systems* 61, 1-16.

## 6.6 Gemüsebau

Autoren: Jan Gräfe, Cathleen Frühauf

Im Freilandgemüsebau werden agrarmeteorologische Methoden und Verfahren vor allem in der Bewässerungssteuerung, dem Folienmanagement im Rahmen des Spargel- und Frühgemüseanbaus und bei der Planung von Fungizidspritzungen im Zwiebel- und Spargelanbau eingesetzt.

### 6.6.1 Bewässerungssteuerung

In Deutschland muss im Mittel der Jahre von einer negativen klimatischen Wasserbilanz (KWB) über den Zeitraum von April bis September ausgegangen werden. Die klimatische Wasserbilanz stellt dabei die Differenz zwischen dem Niederschlag und der potentiellen Verdunstung (Evapotranspiration) des Feldes über einen Zeitraum dar. Ein anhaltendes Wasserdefizit (= negative KWB) führt zu einer stetigen Abnahme des Bodenwassergehaltes im durchwurzelten Bodenvolu-

men. Wird ein artabhängiger Grenzwert des Bodenwasserzustandes (Tab. 6.6.1) erreicht, muss eine Beregnung erfolgen, um Ertragsreduzierungen zu vermeiden.

Die Wassermenge im Boden kann durch den volumetrischen Wassergehalt  $\theta$  ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ) oder durch die Bodenwasserspannung  $\psi$  (hPa) charakterisiert werden. Beide Kenngrößen sind über die sogenannte Wasserrückhaltefunktion mathematisch miteinander verknüpft, die aber je Standort und Horizont sehr speziell ausfallen kann. Bei Vorgabe von Bodenart und Humusgehalt lassen sich aber mittlere Werte für einige Kardinalpunkte der Wasserrückhaltefunktion angeben (Tab. 6.6.2). Im Rahmen der Bewässerung sind vor allem der feldtypische volumetrische Bodenwassergehalt, die Feldkapazität (FK), und der sogenannte Permanente Welkepunkt (PWP) von Interesse (siehe auch Kapitel 3.2). Die Feldkapazität stellt sich zwei bis drei Tage nach ausgiebigen Niederschlägen ein und gibt die Menge an Wasser an, die entgegen der Schwerkraft gehalten werden kann (keine Versickerung). Der Permanente Welkepunkt kennzeichnet die kritische Wasserspannung von 1,5 MPa, ab der viele Pflanzenarten keine Wurzelwasseraufnahme mehr realisieren können. Das pflanzenverfügbare Bodenwasser oder auch die nutzbare

Tab. 6.6.1: Zusammenstellung einiger artspezifischer Kennzahlen zur Bewässerungssteuerung im Gemüsebau

Art bzw. Anbauform	$\Psi_{\text{krit}}$ hPa	nFK <sub>Krit</sub> %	Erforderliche Kulturwochen bis zur Erschließung der Bodenschicht	
			30...60 cm	60...90 cm
Blumenkohl	120-150	55	7	
Brokkoli		55	7	
Buschbohnen	260-400 (bis Blüte) 160-400 (ab Blüte)	55	10	
Buschtomate	160-200	60	ne	
Chicorée	200-240		8	14
Chinakohl	140-160		6	
Dill			ne	
Einlegegurken	160-200	50	ne	
Erbsen	160-200	65	6	
Feldsalat		70	ne	
Grünkohl			11	
Knollenfenchel			7	
Kohlrabi	160-200		ne	
Kürbis		65	10	
Möhren	200-240	65	8	
Pastinake			12	
Petersilie			10	
Poree	160-200		7	
Radies		70	ne	
Rettich			5 (Japanischer)	
Rharbarber			2. Standjahr	3. Standjahr
Rosenkohl	160-200	55	8	15
Rote Beete			9	
Rotkohl	120-200	55	8	
Rucola		70	ne	
Salat	160-200	70	ne	
Schwarzwurzel	200-240		8	16
Sellerie	140-160	80	10	
Spargel	200-240	55	1. Standjahr	2. Standjahr
Spinat	160-200	80	ne	
Weißkohl	120-200	55	7	14 (späte Sorten)
Wirsing	120-200		8	14 (späte Sorten)
Wurzelpetersilie			9	
Zwiebeln	200-240	70	ne	

nach Bielka (1988), Hartmann (2000), Feller (2011), Allen (1998), ne = nicht erschließbar

Feldkapazität ( $n_{FK} = FK - PWP$ ) wird über die durchwurzelten Bodenschichten betrachtet. Da je nach Bodenart die Menge des pflanzenverfügbaren Wassers sehr unterschiedlich ausfällt, wird der Wassergehalt meist in Prozent nutzbarer Feldkapazität angegeben (Tab. 6.6.1, vgl. auch Kapitel 3.2).

Liegt der aktuelle Bodenwassergehalt im durchwurzelten Bodenvolumen bei mind. 70 % $n_{FK}$ , sind in der Regel die Gemüsepflanzen ausreichend mit Wasser versorgt. Eine stetige Evaporation der Bodenoberfläche (0-10 cm) und Transpiration des Pflanzenbestandes kann den Wassergehalt im durchwurzelten Bodenvolumen aber nachhaltig absenken und eine Trockenstressreaktion der Pflanze auslösen. Die pflanzlichen Reaktionen reichen dabei vom teilweisen Schließen der Blattspaltöffnungen, über leichte Hemmungen der Blattentfaltung bis zur Reduzierung der Anzahl und des Volumens von vermarktungsfähigen Organen. Durch eine rechtzeitige Bewässerung auf ca. 90 % $n_{FK}$  im durchwurzelten Bodenvolumen kann dem Risiko der Reduzierung des Marktertrages durch Trockenstressreaktionen vorgebeugt werden.

Entscheidend für eine professionelle Bewässerung sind, auch unter Berücksichtigung der Wetterprognose, der optimale Startzeitpunkt und die richtige Bewässerungsmenge. Die Bestimmung des Startzeitpunkts erfolgt dabei häufig auf der Basis von Bodensensoren, agrarmeteorologischen Wasserhaushaltsmodellen oder Pflanzensensoren. Die Ermittlung der geeigneten Bewässerungsmenge erfordert die Kenntnis des aktuellen Bodenwassergehaltes, der Durchwurzelungstiefe (Tab. 6.6.1) und der horizontspezifischen Kardinalpunkte der Wasserrückhaltefunktion (FK, PWP, Tab. 6.6.2). Idealerweise werden aber aktuelle Bodenfeuchtedaten von Sensoren unterhalb der durchwurzelten Bodenschicht zur Terminierung der aktuellen Bewässerungsgabe benutzt.

Die Bemessung der notwendigen Bewässerungsmenge, insbesondere bei der Kombination von leichten, sandigen Böden (geringere Menge an pflanzenverfügbarem Wasser) und flachwurzelnden Gemüsearten (z. B. Kopfsalat), ist besonders schwierig, da hier leicht Versickerungsverluste auftreten können. Auf Schlägen mit Oberflächenneigung sollte die Intensität der Bewässerungsgabe deutlich unterhalb der zu erwartenden Infiltrationsrate (Tab. 6.6.2) liegen, um einen Oberflächenabfluss mit einhergehender Erosion und ungleichmäßiger Wasserversorgung zu vermeiden.

#### Sensorik zur Erfassung des Wasserzustandes im Boden

Im Wesentlichen kommen Sensoren zur Messung des Bodenwasserpotentials (Tensiometer) und des volumetrischen Bodenwassergehaltes (TDR/TDT oder FDR-Prinzip) zum Einsatz. Im Idealfall wird man den Bodenfeuchtestatus schichtweise (2 - 4 Sensoren je 30 cm Schicht je nach Bodenheterogenität) erfassen. Insbesondere für eine Dauerinstallation in tieferen Schichten (30 - 60, 60 - 90 cm) sollten wartungsfreie, präzise, energiesparsame und netzwerktaugliche Sensoren zur Anwendung kommen, die möglichst keine bodenspezifische Kalibration erfordern (Abb. 6.6.1, siehe Kapitel 3.2).



Abb. 6.6.1: Digitale Bodenfeuchtesensorik zur Bewässerungssteuerung (a) „Trockenes“ Tensiometer (Tensiomark) und (b) TDT-Sensor (Acclima), Foto: J. Gräfe, IGZ Großbeeren.

Als Vorteile der TDR-Technik im Vergleich zu Tensiometern wäre eine schnellere Sensorreaktion auf Bodenfeuchteänderungen und ein größeres repräsentiertes Bodenvolumen zu nennen. Allerdings erfordern extrem humose (> 10 %), tonhaltige (> 40 %) und salzige (> 5 dS/m EC) Böden eine bodenspezifische Eichung von TDR-Sensoren, wobei die preiswerteren FDR-Sensoren in der Regel immer bodenspezifisch zu kalibrieren sind. Der allgemein benötigte Kennwert der schichtweisen Feldkapazität kann entweder aus der Bodenart abgeschätzt (Tab. 6.6.2), im Rahmen einer Probennahme und Laboranalyse ermittelt oder an Hand von eigenen TDR-Sensoraufzeichnungen im Feld (gemäß obiger FK-Definition) bestimmt werden.

#### Sensorik zur Erfassung des Wasserzustandes in der Pflanze

Insbesondere für tiefwurzelnde Arten mit großem Reihenabstand oder beim Einsatz von Tropfbewässerungsanlagen (z. B. Spargel) stellt sich die repräsentative Messung der Bodenfeuchte im aktuell durchwurzelten Bodenvolumen als sehr schwierig dar. Unter diesen Umständen ist das Monitoring von pflanzlichen Wasserzustandsparametern oder korrelierender Sekundärmerkmale sinnvoller. So wird schon seit den 1960er Jahren eine Methode (Scholander, 1965) verwendet, die es erlaubt, das Wasserpotential von pflanzlichen Geweben durch Registrierung des erforderlichen Überdruckes zum Herauspressen des Pflanzensaftes zu messen (Abb. 6.6.2).

Führt man diese Messungen zum Zeitpunkt der Morgendämmerung durch („Predawn Water Potential“), wenn der Unterschied zwischen dem Pflanzen- und Bodenwasserpotential normalerweise gering ist, kann man den ermittelten Druck als guten Schätzwert des mittleren Wasserpotentials des durchwurzelten Bodenvolumens ansehen. Bislang ermittelte kritische Wasserpotentialwerte sind im Bereich von 0,1 - 0,2 MPa (Spargel) und 0,3 MPa (Weinreben) zu finden. Da die Erfassung des Wasserpotentials zum Zeitpunkt der morgendlichen Dämmerung, vor allem im Sommer, wenig praktikabel ist, wurde die Verwendung des mittäglichen Stängelwasserpotentials vorgeschlagen und z. B. im kalifornischen Obstbau erfolgreich angewendet. Wesentlich leichter

**Tab. 6.6.2: Bodenphysikalische Grunddaten zur Bewässerungssteuerung für Sande und Schluffe. (Kennzahlen basierend auf Renger (2009) mit folgenden spezifischen Annahmen: mittlere Lagerungsdichte (Ld3); 1,5 % Humusgehalt für Sandböden (h2); 2 % Humusgehalt für Lehm Böden (70% h2 + 30% h3 Zuschläge/Abschläge); kumulative Infiltration über eine Stunde berechnet mit Hydrus 1D Version 4; KA5: Bodenkundliche Kartieranleitung in der 5. Auflage; pF: log10(hPa))**

Bodenart lt. KA5	Ton %	Schluff %	Sand %	Infiltration mm/h	FK pF	FK Vol%	70%nFK pF	PWP Vol%
reiner Sand (Ss)	0...5	0...10	85...100	205	1.9	17	2.31	4
schwach lehmiger Sand (S12)	5...8	10...25	67...85	75	2	23	2.45	7
mittel lehmiger Sand (S13)	8...12	10...40	48...82	39	2	24	2.39	9
stark lehmiger Sand (S14)	12...17	10...40	43...78	50	2.1	27	2.58	11
schluffig-lehmiger Sand (Su)	8...17	40...50	33...52	38	2.1	28	2.59	13
schwach toniger Sand (St2)	5...17	0...10	73...95	148	2.1	21	2.57	9
mittel toniger Sand (St3)	17...25	0...15	60...83	95	2.2	29	2.7	17
schwach schluffiger Sand (Su2)	0...5	10...25	70...90	105	2.1	20	2.54	7
mittel schluffriger Sand (Su3)	0...8	25...40	52...75	46	2.1	24	2.56	10
stark schluffiger Sand (Su4)	0...8	40...50	42...60	33	2.1	26	2.56	10
schwach sandiger Lehm (Ls2)	17...25	40...50	25...43	28	2.1	31	2.55	18
mittel sandiger Lehm (Ls3)	17...25	30...40	35...53	47	2.1	29	2.59	15
stark sandiger Lehm (Ls4)	17...25	15...30	45...68	56	2.1	29	2.59	15
schwach toniger Lehm (Lt2)	25...35	30...50	15...45	26	2.2	32	2.62	21
mittel toniger Lehm (Lt3)	35...45	30...50	5...35	17	2.3	38	2.75	26
sandig-toniger Lehm (Lts)	24...45	15...30	25...60	21	2.2	36	2.66	22
schluffiger Lehm (Lu)	17...30	50...65	5...33	28	2.2	35	2.68	20
reiner Schluff (Uu)	0...8	80...100	0...20	15	2.1	35	2.64	15
sandig-lehmiger Schluff (Us)	8...17	50...65	18...42	16	2.1	32	2.6	13
sandiger Schluff (Us)	0...8	50...80	12...50	15	2.1	30	2.58	11
schwach toniger Schluff (Ut2)	8...12	65...92	0...27	13	2.2	33	2.68	14
mittel toniger Schluff (Ut3)	12...17	65...88	0...23	12	2.2	34	2.7	15
stark toniger Schluff (Ut4)	17...25	65...83	0...18	11	2.2	36	2.69	17

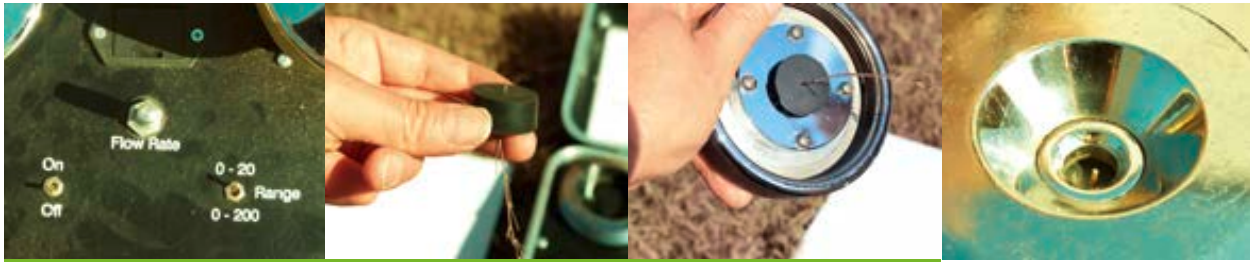


Abb. 6.6.2: Anwendung der Scholander Druckapparatur zur Bestimmung des Wasserpotentials eines Spargeltriebes, Fotos: J. Gräfe, IGZ Großbeeren.

zu automatisieren sind aber Registrierungen der Stängeldicke mit LVDT-Wegaufnehmern, die bei der Tomate und Spargel auch gut als Ersatzmessungen des Stängelwasserpotentials angesehen werden können. Diese Methode befindet sich allerdings noch nicht im produktiven Feldeinsatz.

Eine typische pflanzliche Reaktion auf eine verminderte Wasserversorgung ist die Verringerung der Öffnungsweite der Stomata. Unter sonst vergleichbaren meteorologischen Bedingungen, führt die damit einhergehende verringerte Verdunstung zu einer Erhöhung der Blatttemperatur (Ener-

giebilanz), im Vergleich zu einem ausreichend mit Wasser versorgten Bestand. Die entsprechend erhöhte langwellige Abstrahlung des Blattes kann man dann über Infrarotthermometer (IRT) sensorisch erfassen (Abb. 6.6.4).

Obwohl die kontaktfreie Anwendung von IRTs relativ elegant erscheint, ist ihre praktische Nutzung nicht trivial, da häufig das erfasste Signal auch Abstrahlungen der Bodenoberfläche sowie Reflexionen der atmosphärischen Gegenstrahlung enthält. Unter den ariden Bedingungen in Arizona wurde diese Steuerungsmethode bereits in den 80er Jahren entwickelt (Jackson, 1981). Im Vergleich dazu sind die Bedingungen in Deutschland vor allem durch ein kleineres Dampfdruckdefizit und geringere Einstrahlung gekennzeichnet. Dies führt zu einer schlechteren Unterscheidbarkeit zwischen gestressten bzw. mit Wasser unterversorgten und stressfreien Kulturen. Daher sind in Deutschland IRT basierende Verfahren im Rahmen der Bewässerungssteuerung relativ wenig erprobt.

#### Verdunstungsberechnung

Es ist relativ kompliziert, die Verdunstung von Pflanzenbeständen aus gewöhnlichen Wetterstationsdaten zu berechnen. Eine erste physikalisch-basierte Annäherung an das Problem für relativ einfache natürliche Oberflächen, wie brache Böden und Grasnarben, machte Penman (1948) und es folgten Weiterentwicklungen bis zur heute häufig verwendeten Penman-Monteith Gleichung (FAO56-Grasverdunstung, Allen, 1998). Hierbei erfolgt die tägliche oder stündliche Verdunstungsberechnung ( $ET_{PM}$ ) für eine wohl definierte Referenzoberfläche (Gras) aus standardmäßigen meteorologischen Größen wie Globalstrahlung, Luftfeuchte, Lufttemperatur und Windgeschwindigkeit. Auf der Grundlage von wägbaren Lysimetern fand man proportionale wie saisonale Beziehungen zwischen der Evapotranspiration des Pflanzenbestandes ( $ET_a$ ) und der berechneten Referenzverdunstung nach Penman-Monteith:  $ET_a = K_c(t) \cdot ET_{PM}$ . Viele nationale und internationale Untersuchungen in den 80er und 90er Jahren waren nun darauf ausgelegt, diesen saisonalen  $K_c$ -Faktoren für verschiedene Pflanzenarten des Acker-, Gemüse- und Obstbaus zu bestimmen (Hartmann, 2000; Paschold, 2010; Paschold et al., 2011; Allen, 1998, siehe Abb. 6.6.5).

Mit der Verfügbarkeit der Verdunstung ( $ET_a$ ) und des Niederschlages ( $P$ ) – direkt oder vom Radolan-System – in mindestens täglicher Auflösung sowie einer guten Kenntnis der wesentlichen Boden- und Pflanzeigenschaften (Tab. 6.6.2) kann nun eine einfache Bodenwasserbilanzierung und


















Abb. 6.6.3: Kontinuierliche Messung der Stängeldicke von Spargel durch einen Wegaufnehmer, Foto: J. Gräfe, IGZ Großbeeren.



Abb. 6.6.4: Präparierter LVDT-Wegaufnehmer für Stängeldickenmessungen (links) und Infrarotthermometer (rechts) zur Erfassung der Blatt- bzw. Bestandestemperatur, Foto: J. Gräfe, IGZ Großbeeren.

Abb. 6.6.5: Stadienabhängige Auflistung (Auszug) der Kc-Faktoren für das Geisenheimer System (Hochschule Geisenheim, 2014) bei Verwendung der Penman-Monteith Gleichung zur Ermittlung der Referenzverdunstung.

Gemüseart	Stadium 1	Stadium 2	Stadium 3	Stadium 4
<b>Blumenkohl*</b>	 ab Pflanzung BBCH 12 bis 13 <b>0,7</b>	 ab 8. Blatt BBCH 18 <b>1,1</b>	 ab 70 % des Pflanzendurchmessers BBCH 37 <b>1,6</b>	
<b>Brokkoli*</b>	 ab Pflanzung BBCH 12 bis 13 <b>0,7</b>	 ab 8. Blatt BBCH 18 <b>1,1</b>	 ab 14. Blatt BBCH 114 <b>1,8</b>	
<b>Buschbohnen*</b>	 ab Auflaufen BBCH 09 <b>0,4</b>	 ab Blühbeginn BBCH 61 <b>1,1</b>	 1. Hülse hat volle Länge BBCH 71 <b>1,3</b>	
<b>Chinakohl</b>	 ab Pflanzung BBCH 12 bis 13 <b>0,7</b>	 ab 6. Blatt BBCH 16 <b>1,1</b>	 Kopfbildung beginnt BBCH 41 <b>1,6</b>	
<b>Eissalat</b>	ab Pflanzung BBCH 12 bis 13 <b>0,7</b>	ab 7. bis 9. Blatt BBCH 17 bis 19 <b>1,1</b>	Kopfbildung beginnt BBCH 41 <b>1,3</b>	30 % der Kopfgröße erreicht BBCH 43 <b>1,6</b>
<b>Endivien</b>	ab Pflanzung BBCH 12 bis 13 <b>0,7</b>	ab 7. Blatt BBCH 17 <b>1,1</b>	ab 10. Blatt BBCH 110 <b>1,6</b>	
<b>Fenchel*, Knollen-</b>	 ab Pflanzung BBCH 12 bis 13 <b>0,7</b>	 ab 5. Blatt BBCH 15 <b>1,3</b>	 ab 8. Blatt BBCH 18 <b>1,8</b>	

Bewässerungssteuerung vorgenommen werden. Die wesentlichen Prinzipien wurden dabei in der oftmals verwendeten Richtlinien der „Geisenheimer“ Bewässerungssteuerung herausgearbeitet:

- Dynamische Festlegung der Einzelgabenhöhen ( $KWB_{krit}$ ) der Bewässerung (10 - 40 mm) auf der Grundlage bekannter artspezifischer kritischer Bodenwassergehalte (siehe Tab. 6.6.1 oder standardmäßig 60 %nFK), der Wurzeltiefe und einer Wiederbefeuchtung auf 90 %nFK der durchwurzelten Bodenschicht.
- Tägliche Berechnung und Summierung der Klimatischen Wasserbilanz ( $KWB_{sum} = KWB_{sum} + (P - ET_a)$ ) seit dem Zeitpunkt der letzten Bodenwassersättigung bzw. Bewässerung. Bei sehr starken Niederschlägen, wo  $KWB_{sum}$  deutlich positiv ist, wird die Bilanzierung 1 - 2 Tage ausgesetzt.
- Hat  $KWB_{sum}$  den jeweils zum Entwicklungszustand der Pflanzen anzusetzende  $KWB_{krit}$  erreicht und herrscht für die kommenden Tage geringe Niederschlagsersparung, so erfolgt eine Bewässerung in Höhe von  $|KWB_{krit}|$ , damit die Bodenwasservorräte wieder aufgefüllt werden.

Komplexere Softwarelösungen zur Bewässerungssteuerung (BEREST-90 oder AgrowetterBeregnung) berücksichtigen rechnerisch weitere Faktoren wie die Reduzierung der Verdunstung ( $ET_a$ ) bei abnehmendem Bodenwassergehalt und die Stressabhängigkeit vom Verdunstungsanspruches der Atmosphäre und dem aktuellen Pflanzenstadium.

## 6.6.2 Folienmanagement

### Bleichspargelanbau

Derzeit werden im Bleichspargelanbau massiv Folien-Bedeckungssysteme eingesetzt, um eine Ernteverfrüherung und eine Qualitätssicherung zu erzielen (Abb. 6.6.6). Insbesondere die Temperatur in 20 cm Dammtiefe ( $T_{20}$ ) und die Temperaturdifferenz zwischen den Dammtiefen 5 und 40 cm ( $\Delta T$ ) sind dabei erprobte Steuerkriterien für ein Folienmanagement zur Erzeugung von qualitativ hochwertigem Bleichspargel. Typische Handlungsoptionen sind dabei die Wahl der Folienseite bei weiß/schwarzen Taschenfolien und der Rückbau bzw. die Wiedererrichtung des Folientunnels. Betriebsleiter reagieren dabei in aller Regel nur auf einen ungünstigen Bodentemperaturzustand, der sich bereits eingestellt hat.

Dabei könnte eine Qualitätssicherung und Arbeitskräfteplanung noch wirksamer erfolgen, wenn die künftigen Temperaturen im Spargeldamm für die nächsten Tage bekannt wären. Genau diesen Service leisten eben problemspezifische Prognosemodelle, wie z. B. *AspPro*, die in der Regel regional-spezifische Wetterprognosen des DWD als Inputinformation nutzen. *AspPro* ist eine am Leibniz-Institut für Gemüse- und Zierpflanzenbau (IGZ) entwickelte agrarmeteorologische Software, die unter Nutzung von Informationen zum Boden, dem stündlichen Wetter, der Dammgeometrie und der genutzten Abdeckung bzw. deren zeitlicher Abfolge, die stünd-



Abb. 6.6.6: Typische Bedeckungssysteme im Bleichspargelanbau: Schwarz-weiße Taschenfolie überdeckt mit einem Folientunnel (vorn), mit der schwarzen Seite obenliegend (Mitte) oder weißer Folienseite (hinten), Foto: J. Gräfe, IGZ Großbeeren.



Tab. 6.6.3: Erforderliche Inputdaten für AspPro

Gehalte im A <sub>p</sub> -Horizont	Stündliche Wetterdaten	Dammgeometrie	Folienanwendung
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ton</li> <li>• Schluff</li> <li>• Sand</li> <li>• Humus</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Globalstrahlung</li> <li>• Windgeschwindigkeit</li> <li>• relative Luftfeuchte</li> <li>• Lufttemperatur</li> <li>• Niederschlagsmenge</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reihenabstand</li> <li>• Reihenausrichtung</li> <li>• Breite der Dammkrone</li> <li>• Dammhöhe</li> <li>• Winkel der Dammflanke</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Änderungstermine</li> </ul>

Tab. 6.6.4: Ermittelte Modellfehler der Temperatur (Root mean squared error) des AspPro Modellsystems für schwarz/weiße Taschenfolien (SWT, n=21524 Stunden) und Folientunnel über schwarz/weiße Folien (FT/SWT, n=6040 Stunden).

Dammtiefe (cm)	Fehler (K)	
	SWT	FT/SWT
0	2,33	2,27
5	1,32	1,36
20	0,84	0,98
40	0,79	0,71

lichen Temperaturen im Spargeldamm aus der Lösung der Energiebilanz- und der Wärmeleitungsgleichung berechnet. Die erforderlichen thermischen und hydraulischen Bodenparameter werden vollständig aus der Sand-, Schluff- und Tonfraktion sowie dem Humusgehalt des A<sub>p</sub>-Horizontes des jeweiligen Standortes ermittelt.

AspPro wurde anhand historischer Monitoringdaten aus Rheinland-Pfalz intensiv getestet. Für einen Zeitraum von Anfang März - Ende Mai konnte dabei eine sehr gute Vorhersagegüte nachgewiesen werden (Tab.6.6.4).

Nunmehr bieten einige agrarmeteorologische Internetdienste in Rheinland-Pfalz (<http://www.am.rlp.de>), Bayern (<http://wetter-by.de>) und Brandenburg (<http://www.spargelprognosen.de>) sowohl aktuelle Monitoring- als auch AspPro-Prognosedaten für die wichtigsten Bedeckungssysteme im Bleichspargelanbau an.

Im Rahmen der AMBER Systems werden auch vom DWD prognostizierte Extremtemperaturen für Lochfolien und Vliese auf Anfrage bereitgestellt. Diese Folientypen finden im klassischen Frühgemüseanbau Verwendung und sind ebenso Bestandteil von Temperaturmonitoring und einfachen statistischen Modellprognosen (<http://www.am.rlp.de>).

### 6.6.3 Pilzliche Erkrankungen

Der wichtigste Schaderreger im Zwiebelanbau ist der Falsche Mehltau (*Peronospora destructor*, Abb. 6.6.7). Seine Entwicklung ist witterungsabhängig und wird wesentlich vom

Bestandsklima, d. h. von der Bestandsdichte und der Blattflächenentwicklung beeinflusst (Leinhos et al., 2010).

Das Modell ZWIPERO zur Vorhersage des Sporulations- und Infektionsrisikos wurde am Zentrum für Agrarmeteorologische Forschung (ZAMF) des DWD entwickelt. Es erlaubt die präzise Planung des Krankheitsmonitorings und einen praxisbezogenen Fungizideinsatz (Friedrich et al., 2003). Die Anbaudaten eines Musterschlages gehen neben den Wetterdaten in die Berechnungen ein. Die Modellierung der Bestandsentwicklung erfolgt durch ein ontogenetisches Modell. Das Bestandsklimamodell BEKLIMA simuliert Temperatur, relative Luftfeuchte und Blattnäse im Zwiebel-

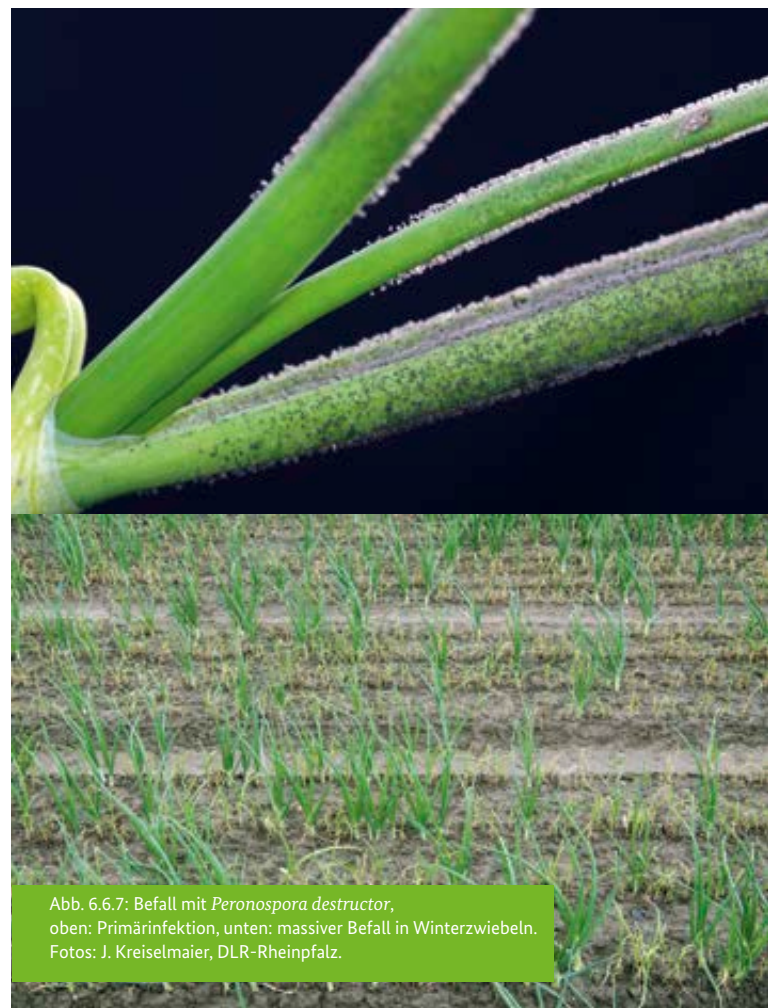
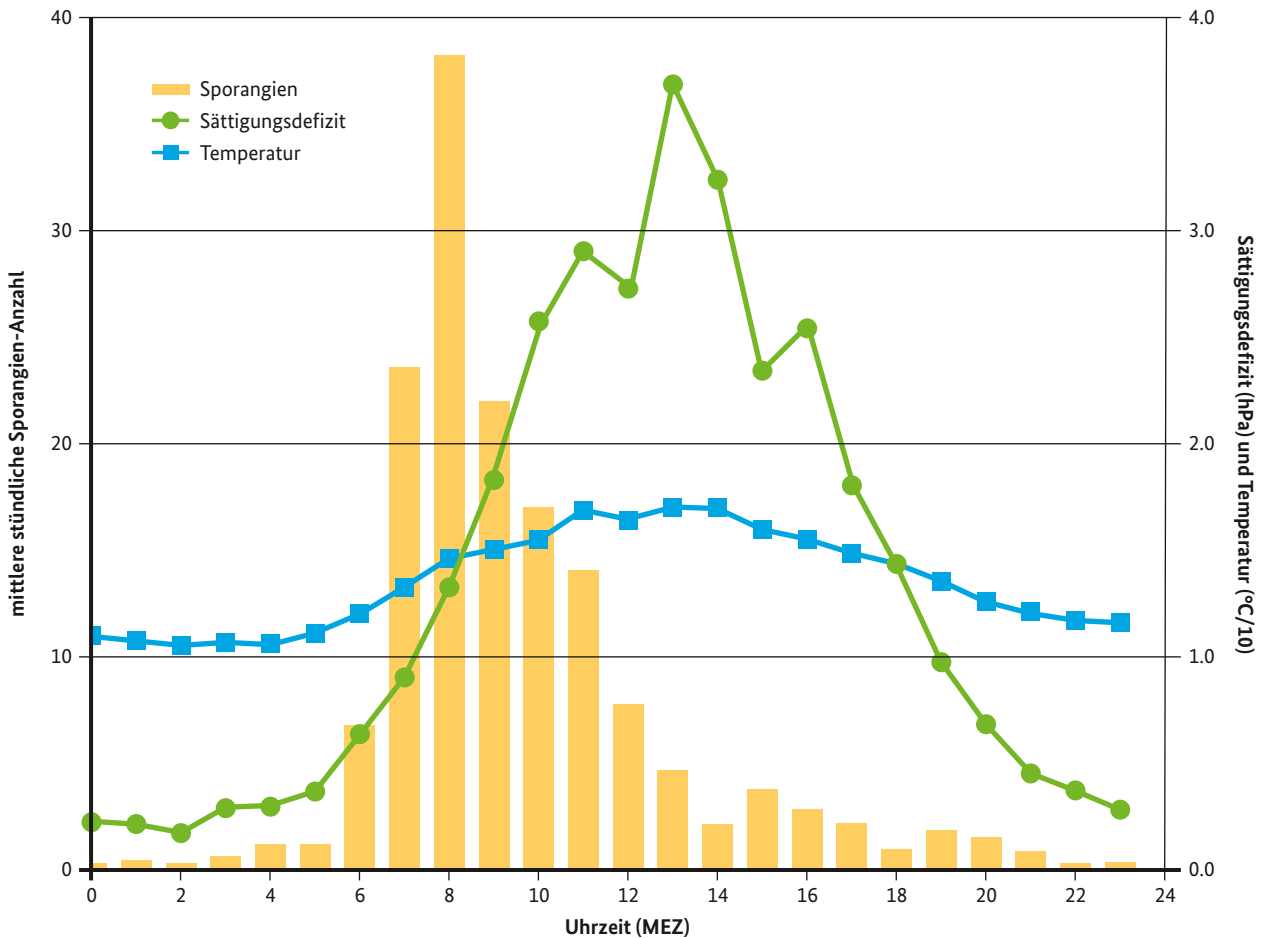


Abb. 6.6.7: Befall mit *Peronospora destructor*, oben: Primärinfektion, unten: massiver Befall in Winterzwiebeln. Fotos: J. Kreisemaier, DLR-Rheinpfalz.

Abb. 6.6.8: Mittlerer täglicher Verlauf der stündlich freigesetzten Sporangien, Sättigungsdefizit und Temperatur innerhalb des Bestandes; Mittelwert aus 13 repräsentativen Tagen aus den Monaten Juni und Juli 1993, Braunschweig (Friedrich et al., 2003).



bestand. Ausgehend von der Bodenfeuchte wird auch eine etwaige Beregnungsmaßnahme berücksichtigt. Die Berechnungen des Bestandsklimamodells dienen als Eingangsdaten für das Teilmodell ZWIPERO, das in Abhängigkeit von den herrschenden meteorologischen Bedingungen die Sporangienausschüttung simuliert.

Untersuchungen aus dem Jahr 1993 zeigen eine starke Abhängigkeit der Freisetzung der Sporangien von der Tageszeit und dem herrschenden Sättigungsdefizit (Abb. 6.6.8).

Die Freisetzung von Sporangien erreicht ein bis zwei Stunden nach Sonnenaufgang ihren Höhepunkt und fällt mit dem Anstieg des Sättigungsdefizites zusammen. Die höchsten Sporangien-Konzentrationen werden im Sommer zwischen 7 und 9 Uhr erreicht und gehen danach wieder deutlich zurück (Friedrich et al., 2003). Die Simulationsergebnisse stimmen gut mit den Beobachtungen überein (Abb. 6.6.9).

Die Prognoseberechnung mit dem Simulationsmodell ZWIPERO werden seit 2005 über die Internetplattform (<https://www.isip.de/isip/servlet/isip-de/entscheidungshilfen/gartenbau/zwiebeln>) bereitgestellt.

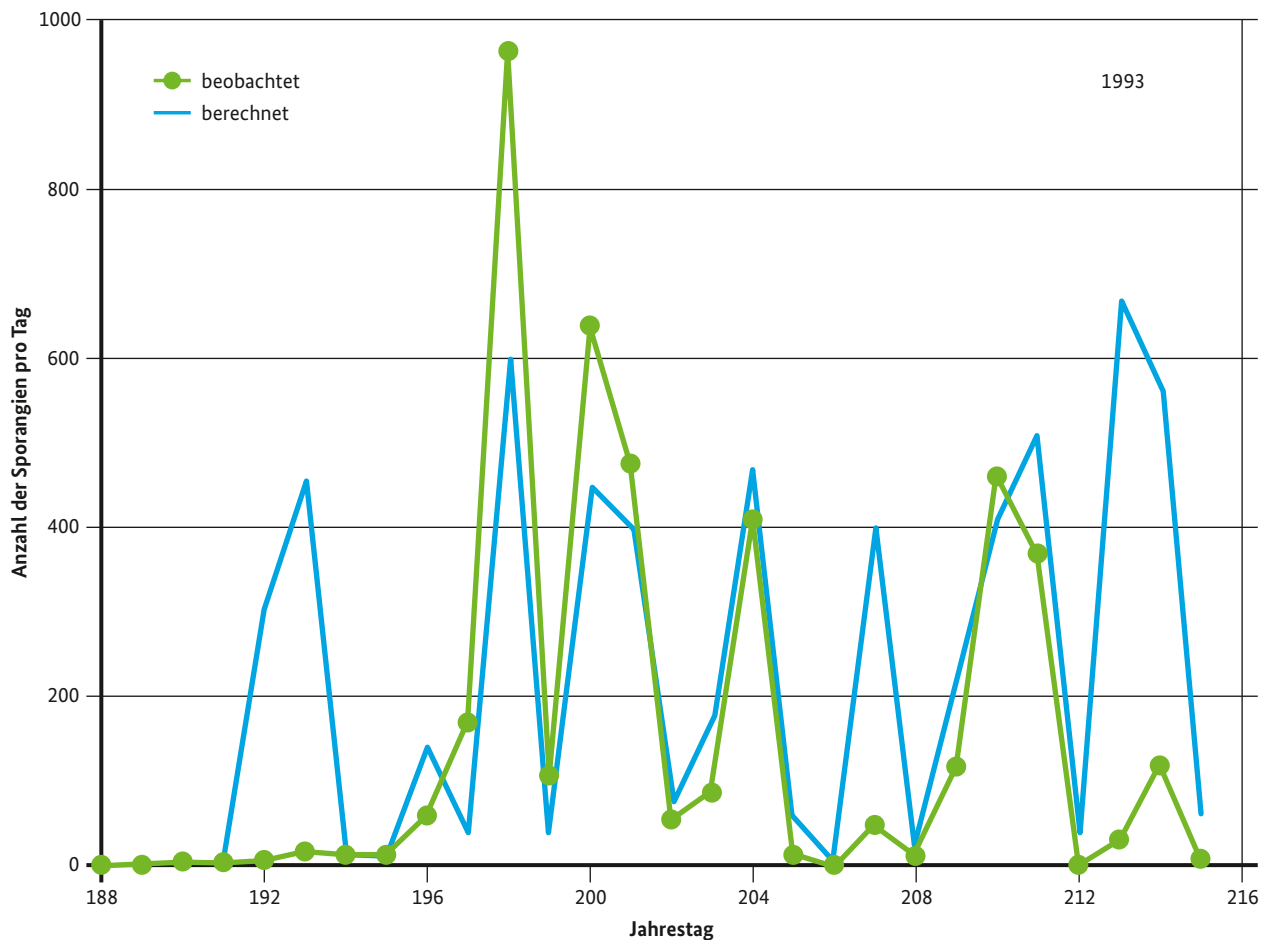
## Literatur

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. (1998): Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome 300.9, D05109.

Bielka, R. und Geissler, T. (1980): Freilandgemüseproduktion, VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag, Berlin.

Feller, C., u.a. (2011): Düngung im Freilandgemüsebau. Schriftenreihe des Leibniz-Instituts für Gemüse- und Zierpflanzenbau (IGZ) 3.

Friedrich, S., Leinhos, G., Löpmeier, F.-J. (2003): Development of ZWIPERO, a model forecasting sporulation and infection periods of onion downy mildew based on meteorological data. European Journal of Plant Pathology 109, S. 35-45.

Abb. 6.6.9: Beobachtete und berechnete Sporangienanzahl von *P. destructor* 1993, Braunschweig (Friedrich et al., 2003).

Hartmann, H. D., E. Pfühl und K. H. Zengerle (2000): Wasserverbrauch und Bewässerung von Gemüse. Geisenheimer Berichte der Forschungsanstalt Geisenheim 44, 194.

Hochschule Geisenheim (2014): Geisenheimer Bewässerungssteuerung für FAO56-Grasverdunstung.

Leinhos, G., Braden, H., Klante, B., Laun, N., Nesperke, M., Landes, A., Röhrig, M. (2010): Modellierung der Bestandsentwicklung von Bundzwiebelsätzen zur Prognose des Befallsrisikos für Falschen Mehltau (*Peronospora destructor*). Poster, 46. Gartenbauliche Tagung.

Paschold, P.-J. (2010): Bewässerung im Gartenbau. Ulmer.

Paschold, P.-J., Frühauf, C., Schaller, J., Kleber, J., Mayer, N. (2011): Geisenheimer Bewässerungssteuerung und FAO-Grasverdunstung. DGG-Proceedings, Vol. 1 (2011), No. 5, 1-5. DOI: 10.5288/dgg-pr-01-05-nm-2011.

Penman, H. L. (1948): Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proceedings of the Royal Society of London, A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. Vol. 193, No. 1032.

Renger, M., Bohne, K., Facklam, M., Harrach, T., Riek, W., Schäfer, W., Wessolek, G., Zacharias, S. (2008): Ergebnisse und Vorschläge der DBG-Arbeitsgruppe „Kennwerte des Bodengefüges“ zur Schätzung bodenphysikalischer Kennwerte. Schriftenreihe Bodenökologie und Bodengesehe 40.

Scholander, P.F., Hammel, H.T., Bradstreet, E.D., Hemmingen, E.A. (1965): Sap pressure in vascular plants. Science 148.3668, 339-346.

## 6.7 Obstbau

Autoren: Michael Blanke, Klaus-Peter Wittich

Ein erfolgreicher Obstbau (Abb. 6.7.1a) ist ohne witterungs-gesteuerte Modelle, die Hinweise über Kulturentwicklung sowie Infektions- und Schädlingsdruck liefern, nicht mehr denkbar. Um die angebotenen Modelle zu nutzen, ist eine Wetterstation vor Ort oder in der näheren Umgebung Voraussetzung (Abb. 6.7.1b), die neben den meteorologischen Standardparametern (wie z. B. Niederschlag, Temperatur und Feuchte) auch spezielle agrarmeteorologische Größen (wie z. B. die Blattbenetzung; siehe Kapitel 3.5) erfasst.



Abb. 6.7.1: a) Apfelanlage zur Ernte und b) Wetterstation in einer Obstanlage, Fotos: M. Blanke, Universität Bonn.

### 6.7.1 Pflanzenentwicklung: Phänologie als Klimaindikator beim Apfel

Temperaturen setzen nicht nur Grenzen für die Anbauwürdigkeit von Kulturen (siehe Kapitel 2), sondern sie steuern innerhalb der Vegetationszeit auch den Beginn bzw. das Ende spezieller Entwicklungsabschnitte. Insofern gelten phänologische Beobachtungen (Abb. 6.7.2) als anerkannte Klimaindikatoren im Obstbau, anhand derer sich der Temperatureinfluss und damit der Klimawandel nachvollziehen lassen (Blanke und Kunz, 2009). Zum Beispiel zeigen phänologische Beobachtungen an zwei Apfelsorten („Golden Delicious“ und „Roter Berlepsch“) in Klein-Altendorf (Meckenheimer Obstanbaugebiet bei Bonn) eine Verfrühung der Blüte und Ernte um acht bis elf Tage für den Zeitraum 1988 - 2007 gegenüber 1958 - 1987 (Tab. 6.7.1). Da beide Entwicklungsstadien sich in zeitlich ähnlicher Weise bewegen, führt der Klimawandel in der hier diskutierten Anbauregion entgegen früherer Annahmen nicht zu einer Verkürzung der Fruchtentwicklungszeit. Rheingauer Beobachtungen (Raum Geisenheim, siehe Abb. 2.5.3) können dagegen diese Aussage nicht bestätigen und zeigen die Komplexität des Klimawandelproblems.

Der Klimaforschung im Obstbau kommt zugute, dass die inzwischen über 100 Jahre alte Apfelsorte „Golden Delicious“ weltweit angebaut wird. Somit kann nicht nur eine aussagekräftige Gegenüberstellung zeitlicher Trends erfolgen (Abb. 6.7.3), sondern es kann auch ein phänologischer Vergleich klimatisch unterschiedlich geprägter Anbaugelände vorgenommen werden. Eine Forschungskoooperation zum Einfluss des Klimawandels auf die phänologische Entwicklung von Obstgehölzen in 10 Regionen Europas führte den Nachweis, dass bei „Golden Delicious“ die genannte Verfrühung der Apfelblüte um acht bis elf Tage ab 1988 nicht nur in Deutschland, sondern europaweit zu beobachten war, wobei die Apfelblüte in den nördlichen, kühleren Anbaugeländen (Klein-Altendorf/Meckenheim und Gembloux, Belgien) später einsetzte als in den wärmeren südlichen Regionen (Legave et al., 2013). Klein-Altendorf verfügte unter den europäischen Vergleichsstandorten über die ältesten historischen Blühdaten bei „Golden Delicious“ (Abb. 6.7.3). Ähnliche Trends zur Verfrühung, wie bei der Apfelblüte, zeigen lange Beobachtungsreihen des phänologischen Messnetzes des DWD (siehe Kapitel 2.5).

Ursache für die Blühverfrühung sind die im Durchschnitt wärmeren Jahre bzw. Frühjahre nach 1988 (Abb. 6.7.4 und Abb. 6.7.5), wobei Einzeljahre in diesem Zeitabschnitt durchaus kälter sein konnten als der langjährige Durchschnitt.

Vergleicht man die Monatstemperaturen der letzten ca. 30 Jahre (Periode II) mit einer nahezu gleichlangen Vorperiode (Periode I), so findet man in Klein-Altendorf besonders starke Temperaturerhöhungen im Winter und Frühling (Januar bis Mai) sowie im Sommer (Juli, August), während im Juni und September bis Dezember eine geringere Erwärmung festzustellen ist (Abb. 6.7.5).



Abb. 6.7.2: Wichtige Phänologie-Stadien in der Forschung zum rezenten Klimawandel beim Apfel: a) Knospenaufbruch (links), b) Blühbeginn (F1) mit Aufblühen der zentralen Königsblüte (Mitte) und c) Vollblüte (F2, rechts), Fotos: M. Blanke, Universität Bonn.

Tab. 6.7.1: Veränderungen phänologischer Stadien von ‘Golden Delicious’ und ‘Roter Berlepsch’ in Klein-Altendorf unter Einfluss des Klimawandels.

Zeitraum	Blühbeginn	Vollblüte	Ende Blüte	Erntebeginn	Fruchtentwicklung Tage*	Vegetationszeit Tage**
<b>Golden Delicious</b>						
1958–2015	01.05.	07.05.	14.05.	04.10.	152	190
1958–1987	06.05.	11.05.	20.05.	10.10.	152	187
1988–2015	26.04.	01.05.	05.05.	27.09.	152	193
<b>Verfrühung</b>	<b>Blüte 10 Tage früher</b>			<b>Ernte 11 Tage früher</b>		
<b>Roter Berlepsch</b>						
1958–2007	28.04.	04.05.	12.05.	27.09.	146	196
1958–1987	02.05.	08.05.	16.05.	01.10.	146	199
1988–2007	24.04.	29.04.	07.05.	23.09.	147	198
<b>Verfrühung</b>	<b>Blüte 9 Tage früher</b>			<b>Ernte 8 Tage früher</b>		

\* Vollblüte bis Erntebeginn \*\* Blühbeginn bis Beginn Blattfall

Abb. 6.7.3: Blühbeginn von Golden Delicious Apfelbäumen an drei europäischen Standorten.

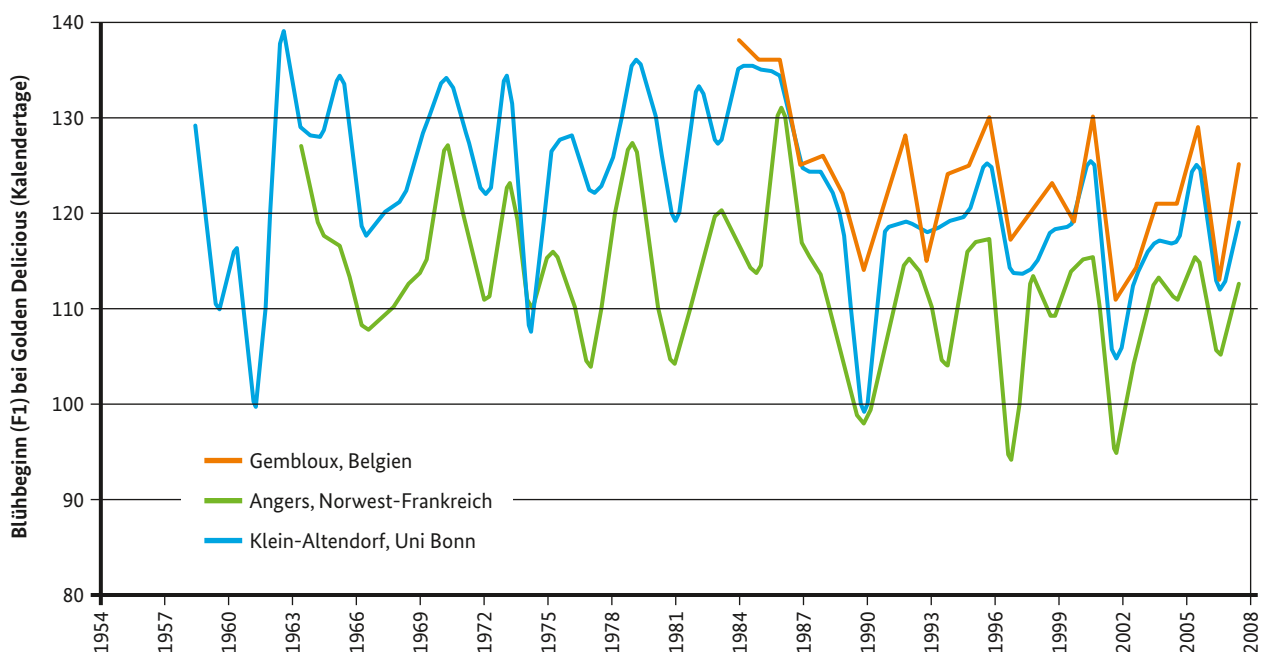


Abb. 6.7.4: Abweichungen der Jahrestemperaturen vom langjährigen Mittel (9,5 °C) in Klein-Altendorf im Meckener Obstbaugebiet (Blanke und Kunz, 2009).

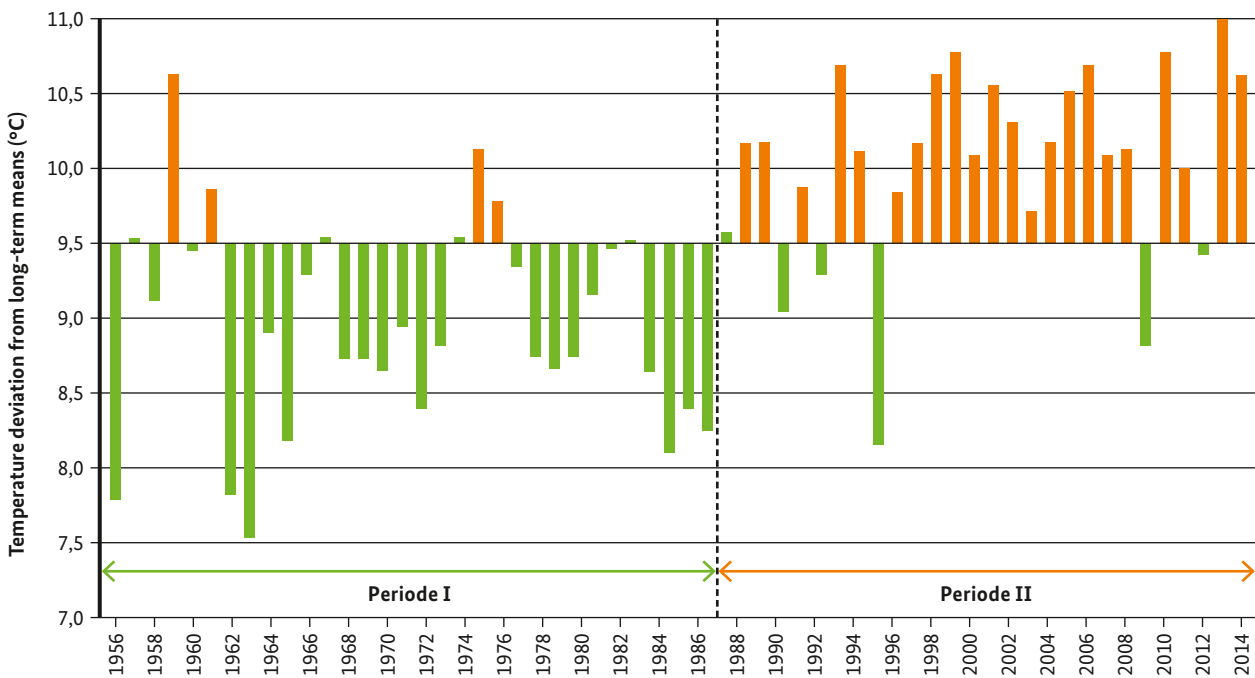
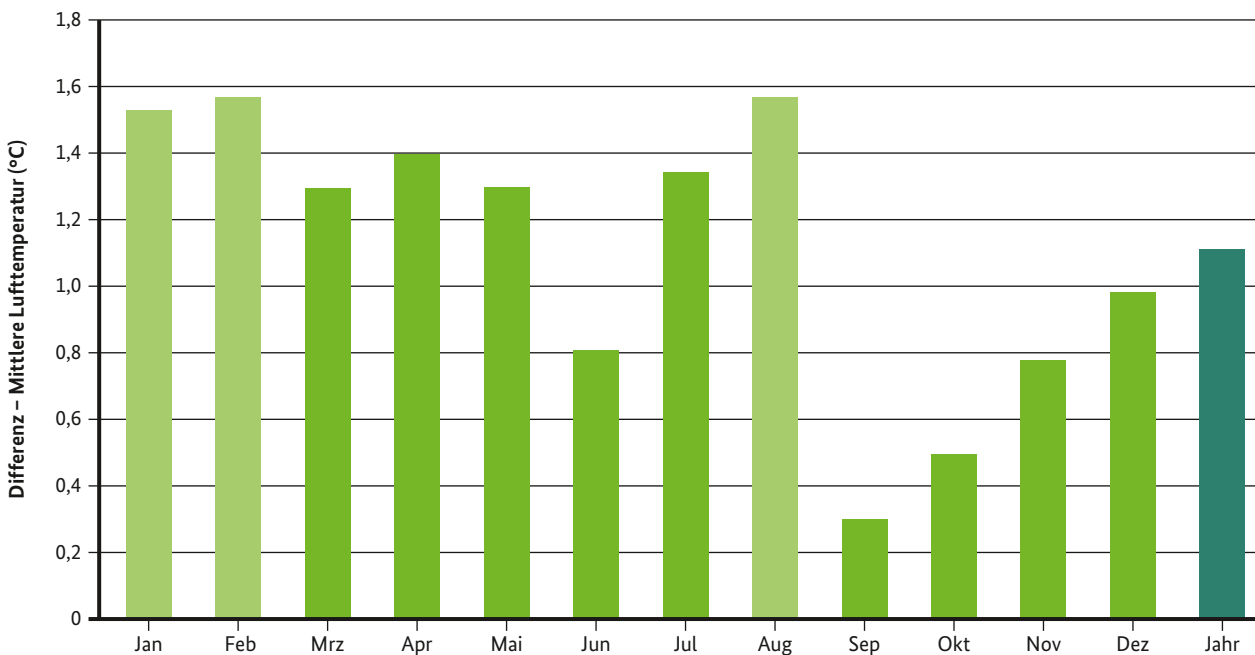


Abb. 6.7.5: Anstieg der Monatsmitteltemperaturen im Zeitraum 1988 - 2015 (Periode II) gegenüber 1956 - 1987 (Periode I).



## 6.7.2 Kälte- und Wärmebedarf von Obstgehölzen

Obstgehölze benötigen Kälte- und Wärmereize, um in einem engen temperaturabhängigen Zeitfenster geordnet, d. h. ohne größere zeitliche Variabilität, zwischen den Einzelpflanzen einer Obstart und -sorte, eine definierte Entwicklungsphase an einem Ort zu erreichen.

### 6.7.2.1 Kältereiz (Chilling)

Kältereize, die Obstgehölze nach dem Blattfall im Winter erfahren, sind erforderlich, um u. a. den Wiederaustrieb und die Blüte im folgenden Frühling zu koordinieren (Kaufmann und Blanke, 2016). Andernfalls, d. h. wenn die sortenspezifischen Kältebedürfnisse während der Winterruhe nicht erfüllt werden, können sich Austrieb und Blüte verzögern.

**Tab. 6.7.2: Auswirkungen fehlenden Kältereizes auf die Physiologie der Obstgehölze (nach Blanke et al., 2012).**

(1)	verzögerter Austrieb
(2)	ungleichmäßiger Austrieb
(3)	verzögerte, ungleichmäßige Blüte
(4)	asynchrone Blüte
(5)	verlängerte Blütezeit
(6)	unzureichende Bestäubung und Befruchtung
(7)	unregelmäßige Abreife der Früchte
(8)	zu späte Fruchtreife (Notreife)
(9)	verzögerter Blattfall
(10)	höhere Anfälligkeit für biotischen Stress

In Tabelle 6.7.2 sind die möglichen Folgen eines fehlenden Kältereizes für Obstgehölze zusammengestellt.

Mithilfe von Modellen lässt sich dieser Kältereiz (sog. ‚Chilling‘) beschreiben. Nach dem gängigsten und einfachsten – aber nicht unbedingt genauesten – Modell gelten Temperaturen von 0 bis 7.2 °C als effektiv für die Erfüllung des sortenspezifischen Kältereizes (Weinberger, 1950). Der Kältebedarf wird durch die aufsummierte Anzahl der Kältestunden zwischen 0 und 7.2 °C ausgedrückt, wobei jede Stunde innerhalb dieses Temperaturbereiches als eine Kältestunde (Chilling Hour, CH) zählt.

Die Anzahl der benötigten Kältestunden variiert in Abhängigkeit von Obstart, Obstsorte und Standort (Blanke und Kunz, 2009; Blanke et al., 2012), beginnend mit Granatapfel (100 - 200 CH), Feige (100 - 300 CH), Kaki (Persimone) (150 - 400 CH), über Aprikose, Pflaume und Pfirsich (500 - 900 CH) sowie Erdbeere (800 - 1300 CH) bis hin zu Apfel und Kirsche

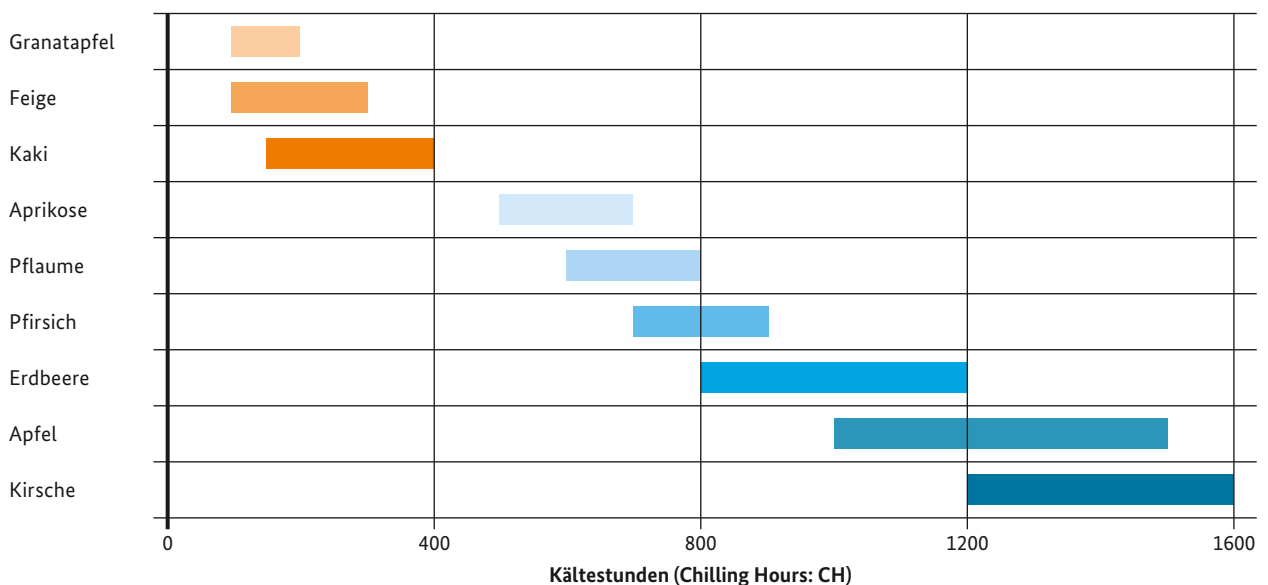
(bis zu 1600 CH; Abb. 6.7.6; Blanke et al., 2012). Die Rezeptoren für diesen Kältereiz liegen bei den Laub abwerfenden Obstgehölzen in den Knospen, die bereits im Sommer angelegt wurden (Blanke et al., 2012).

Neben dem Kältestundenmodell von Weinberger (1950) haben sich das sog. Utah- Modell (Richardson et al., 1974) mit der Einheit Chill Unit (CU) und das Dynamische Modell von Fishman et al. (1987) mit der Einheit Chill Portion (CP) etabliert (Tab. 6.7.3). Im Gegensatz zu dem einfachen Kältestundenmodell von Weinberger (0 - 7.2 °C) berücksichtigen die beiden anderen Modelle einen breiteren und höheren Temperaturbereich von 0 - 13 °C. Zudem werden die Temperaturen in Kälteeinheiten transformiert, d. h. unterschiedlichen Temperaturen des Bereichs 0 - 13 °C werden differenzierte Kälteeinheiten zugewiesen, um eine gezielte Anpassung an unterschiedliche Wirkungsbereiche zu ermöglichen. Zum Beispiel wird beim Utah-Modell nach Richardson et al. (1974) davon ausgegangen, dass die stärkste Kältewirkung zwischen 2.4 und 9.1 °C liegt. Temperaturen in diesem Bereich werden daher mit dem Faktor 1 versehen (= 1 CU). Niedrigeren oder höheren Temperaturen (1.5 - 2.4 °C bzw. 9.1 - 12.4 °C) wird eine geringere Kältereizwirkung zugeschrieben, weshalb sie einen niedrigeren Faktor erhalten (= 0.5 CU). Temperaturen von 0 bis 1.5 °C bleiben ohne Wirkung, ebenso wie Temperaturen von 12.5 bis 15.8 °C (= 0 CU), während noch höhere Temperaturbereiche den vorher angesammelten Kältereiz sogar wieder aufheben können. So werden die biologischen Wirkungen zwischen 15.9 und 18 °C negativ mit -0.5 CU bzw. über 18°C mit -1 CU bewertet (Tab. 6.7.4).

Alle drei Modelle stammen aus wärmeren Klimaten (USA (Georgia und Utah) sowie Israel) und basieren auf einer Verknüpfung zwischen Temperatur und Pfirsichblüte, d. h. sie beziehen sich nur auf eine einzige Obstart. Zudem bleiben

**Abb. 6.7.6: Bedarf verschiedener Obstarten an winterlichem Kältereiz (Chilling).**

**Kältebedarf (Chilling) einiger Obstarten**



Tab. 6.7.3: Übersicht über drei Modelle zur Berechnung des Kältereizes im Winter

Bezeichnung	Einheit	Autor	Temperaturbereich (°C)	Ursprungsland	Obstart
Kältestunden Modell	Chilling Hours CH	Weinberger 1950	0 - 7,2	Georgia, USA	Pfirsich
Utah Modell	Chill Units CU	Richardson et al., 1974	1,4 - 12,4	Utah, USA	Pfirsich
Dynamisches Modell	Chill Portions CP	Fishman et al., 1987	0 - 13	Israel	Pfirsich

Tab. 6.7.4: Vergleich des Kältestunden-Modells von Weinberger (1950) mit dem Utah-Modell von Richardson et al. (1974) zur Bewertung der biologischen Wirkung unterschiedlicher Temperaturen im Winter.

Temperatur	Faktor beim Weinberger-Modell	Faktor beim Richardson-Modell
unter 0 °C	0	0
0 - 1,5 °C	1	0
1,5 - 2,4 °C	1	0,5
2,4 - 9,1 °C	1 (bis 7,2 °C)	1
9,1 - 12,5 °C	0	0,5
12,5 - 15,9 °C	0	0
15,9 - 18,0 °C	0	-0,5
über 18,0 °C	0	-1

in den Modellen negative Temperaturen, die in den Klimazonen der Ursprungsländer selten auftreten, unberücksichtigt. Dadurch ist die Modellübertragbarkeit

- auf eine andere Obstart und
- in eine Klimazone mit kälteren Wintern (wie z. B. Deutschland)

problematisch.

Im Modellvergleich mit Beobachtungen hat sich meist das Dynamische Modell als verlässlich herausgestellt, zumal es die Geschwindigkeit von Stoffwechselprozessen in der Pflanze in einfacher Form berücksichtigt (Fishman et al., 1987).

Abbildung 6.7.7 zeigt die für die Winterperiode 2013/2014 aufsummierten Kältereize auf Basis der drei Modelle. Es wird deutlich, dass trotz unterschiedlicher Methoden (inklusi-

Abb. 6.7.7: Berechnung der Kältereiz- (Chilling-) Akkumulation im Winter nach den drei Temperatursummen-Modellen für die Station Klein-Altendorf (Kaufmann, unveröffentlicht).

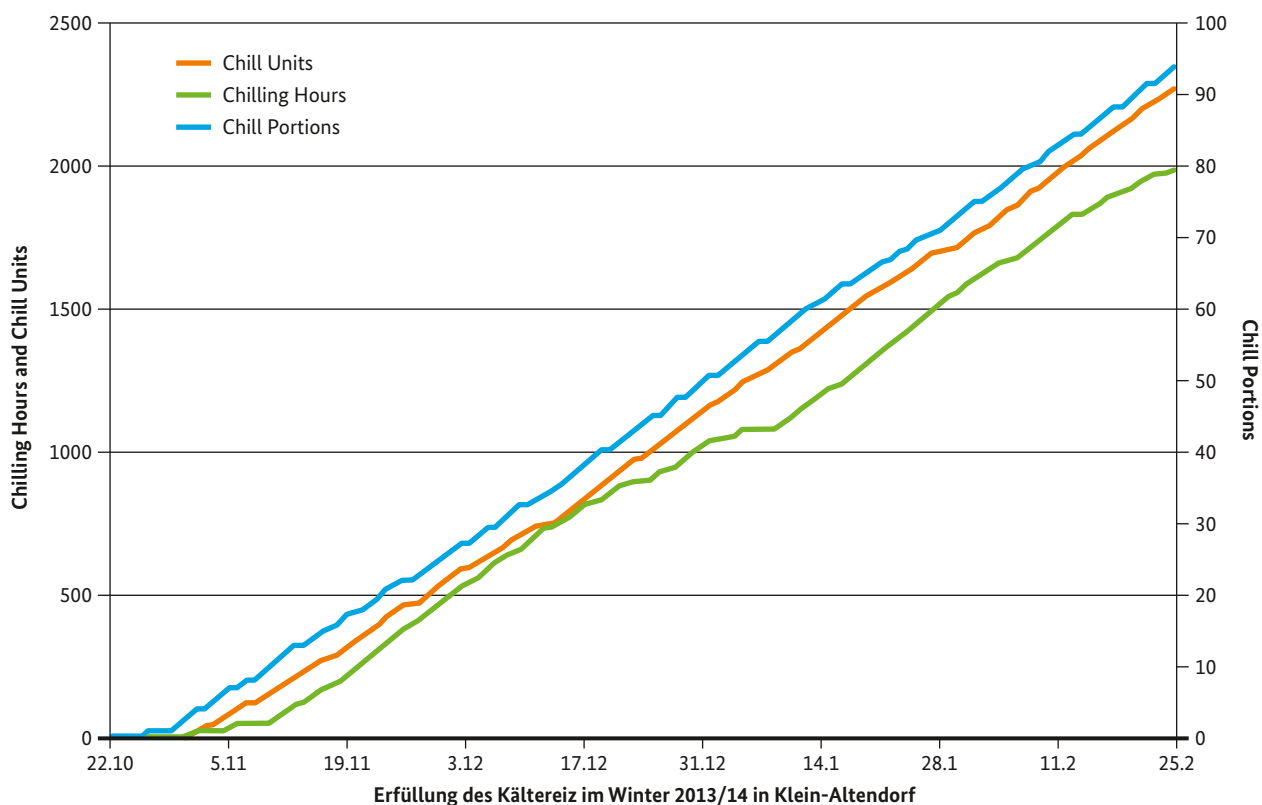






Abb. 6.7.8: Versuche zum Kältebedürfnis (Chilling) von Obstgehölzen mit 120 Containerpflanzen an der Universität Bonn in Klein-Altendorf, Fotos: H. Kaufmann und M. Blanke, Universität Bonn.

ve unterschiedlicher Maßeinheiten wie CH, CU und CP) ähnliche Zeitverläufe ermittelt werden, so dass das grundlegende Prozessverständnis offenbar als ausreichend gesichert angesehen werden kann.

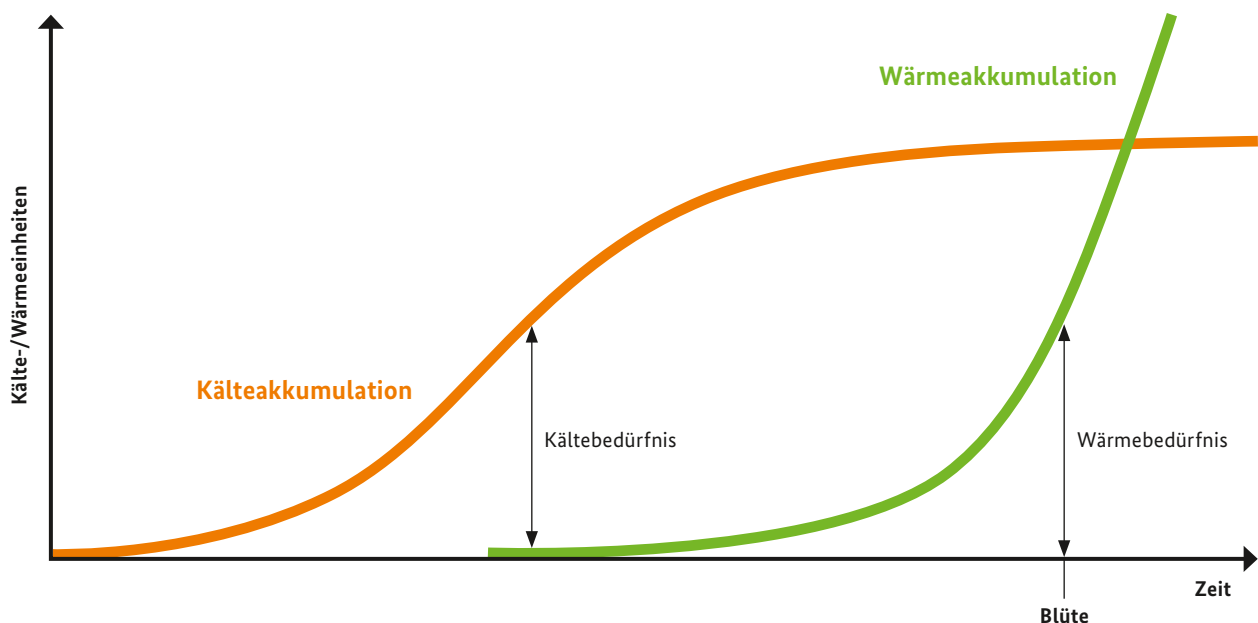
Der gegenwärtige Klimawandel mit wärmeren Wintern (Blanke und Kunz, 2009; Abb. 6.7.5) kann in unseren Obstanbaugebieten – zumindest im Norden – anfangs zu stärkeren Kältereizen führen (Luedeling et al., 2011; Kaufmann und Blanke, 2016). Der Grund hierfür ist, dass die milder werdenden Wintertemperaturen in den kältereizwirksamen Temperaturbereich aufrücken (siehe die effektiven Temperaturbereiche in Tab. 6.7.3). Damit tragen sie verstärkt zur Erfüllung des Kältebedürfnisses bei. Bei weiterer Erwärmung kann der reizauslösende Temperaturbereich überschritten werden, woraus in fernerer Zukunft eine Abnahme des Kältereizes folgt. Um diesen Sachverhalt zu klären, werden gegenwärtig umfangreiche Versuche mit tragbaren Containerbäumen an der Universität Bonn durchgeführt (Abb. 6.7.8).

### 6.7.2.2 Wärmereiz (Forcing)

Nach Erfüllung des Kältereizes sind die Pflanzen in der Lage auszutreiben und zu blühen. Dazu benötigen sie einen auslösenden Wärmeschub (Abb. 6.7.9). Die Bedeutung des Wärmeschubes lässt sich anhand der sogenannten “Barbarazweige“ verdeutlichen. Kirschzweige, die am Barbaratag (4. Dezember) geschnitten werden, beginnen Weihnachten zu blühen, wenn sie in der Zwischenzeit warmen Raumtemperaturen ausgesetzt werden.

Das Wärmesummenmodell von Andersen et al. (1986) berücksichtigt, dass nach erfolgtem Kältereiz (Chilling) höhere Temperaturen (Forcing) in Form aufsummierter Wärmeeinheiten – angegeben in Gradstunden („growing degree hours“, GDH) bzw. Gradtagen („growing degree days“, GDD) – zum Austreiben der Blüten führen. Hierbei finden unterschiedliche Basistemperaturen von 1 - 10 °C Verwendung. Unterhalb der Basistemperatur bleibt die

Abb. 6.7.9; Beziehung zwischen Kältereiz (Chilling) und Wärmebedarf (Forcing) (J. Gebauer, in Blanke et al., 2012)



Temperatur wirkungslos. Oberhalb werden Wärmeeinheiten, die durch die Differenz „Lufttemperatur minus Basistemperatur“ definiert sind, solange aufsummiert, bis eine zuvor statistisch festgelegte Schwelle als rechnerischer Blühtermin überschritten ist (z. B. 200 Gradtage oder 5000 Gradstunden, o.ä.). Diese Schwelle wird in wärmeren Frühjahrsphasen infolge höherer Temperaturdifferenzen rascher erreicht als in kühleren Phasen, was die phänologische Verfrühung der Blüte im Zuge des Klimawandels erklärt.

Ein alternatives Modell, welches speziell auf die Phänologie des Apfels abzielt, ist jenes von Landsberg (1974). Es arbeitet mit überlappenden Temperaturbereichen, in denen die Temperatur teilweise parallel zur Erfüllung sowohl des Kälte- als auch des Wärmereizes beiträgt. Als Basistemperatur für den Beginn der Wärmewirkung und zugleich als optimale Temperatur für die Kältewirkung wird 5 °C verwendet.

### 6.7.3 Frostrisiko und Frostwarnung

In diesem Abschnitt sollen die klimatischen Auswirkungen auf den Frostschutz im Obstbau beschrieben werden.

Trotz globaler Erwärmung bleibt das Spätfrostrisiko für die meisten unserer heimischen Obstarten unvermindert beste-

**Tab. 6.7.5: Zunahme der Tage mit Spätfrost unter -2 °C und Monatstiefsttemperatur zur Zeit der Obstblüte (April) in den letzten 60 Jahren in Klein-Altendorf, Versuchsgut der Universität Bonn.**

Zeitraum	Anzahl Frosttage $\leq -2^{\circ}\text{C}$ (Mittelwert April)	Tiefsttemperatur in °C (April)
1956-1987	1,0	-2,0 °C
1988-2015	1,4	-2,3 °C
Gesamtänderung	+0,4	-0,3 °C

hen. Die rezente Klimaveränderung mit wärmerem Frühjahr führt zu einer früheren Obstblüte (Tab. 6.7.1), wobei die frostempfindlichen Blühstadien (Abb. 6.7.10) in einen Zeitraum mit stärkerer Frostgefahr fallen (Tab. 6.7.5). In den Jahren 1956 bis 1987 zeigte sich fünfmal ein überdurchschnittlich warmer März, davon dreimal verbunden mit Blütenfrost im April und Ertragsrückgang im September. Dagegen war die Lufttemperatur im März der Jahre 1988 bis 2015 sechsmal überdurchschnittlich hoch und fünfmal verbunden mit Frostschäden und Mindererträgen beim Apfel.

Bei vielen Obstarten wie Apfel besteht die Möglichkeit, Frostschäden an den Blüten durch Frostschutzberegnung zu reduzieren (Abb. 6.7.11).



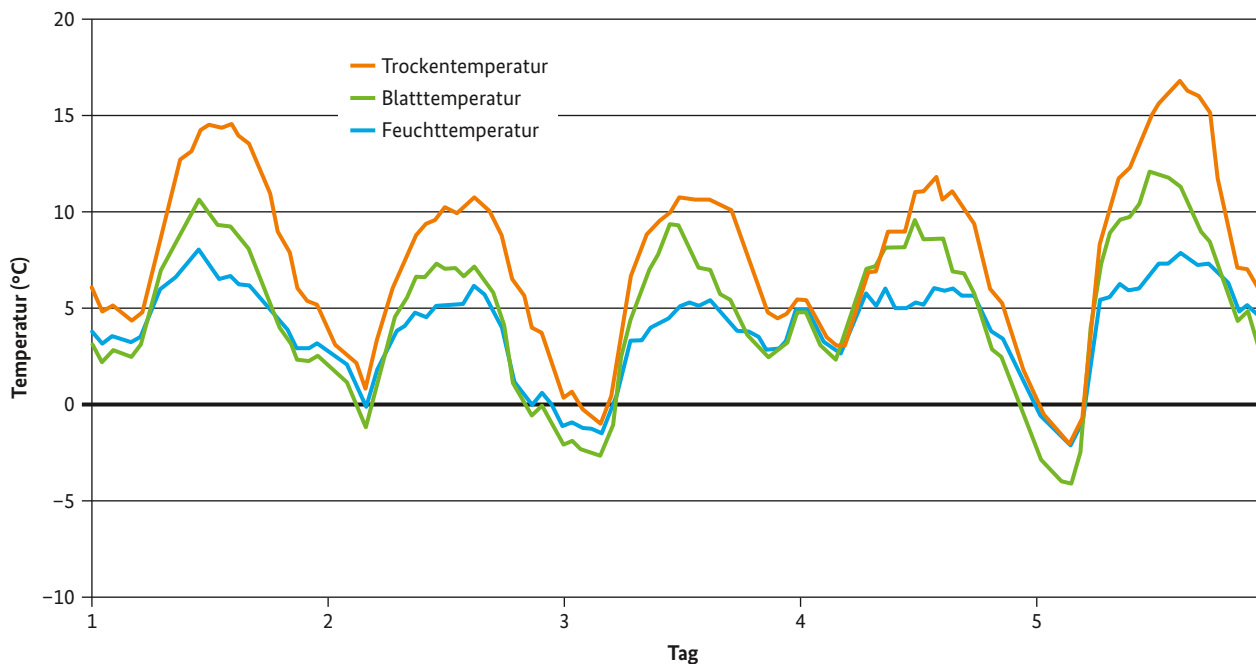
Abb. 6.7.10: a) links: leichter Frostschaden an der früh blühenden Apfelsorte Boskoop im Jahr 2016 und b) rechts: erfrorener Fruchtknoten einer Birne, Fotos: M. Blanke, Universität Bonn.



Abb. 6.7.11: Überkronen-Frostschutzberegnung in einer Apfelanlage in Klein-Altendorf, Fotos: A. Solomakhin/M. Blanke, Universität Bonn.



Abb. 6.7.12: Zeitlicher Verlauf der Trocken- (= Luft-), Blatt- und Feuchttemperatur an der DWD-Station Bremervörde, 1.-5. Mai 2011.



Problematisch für Obstbestände sind vor allem die im Frühjahr auftretenden Spätfroste, da sie Knospen und Blüten schädigen und als Folge die Ernte gefährden können. Hinweise, ob mit Frost zu rechnen ist, liefert eine Reihe von Temperaturparametern. Hierzu gehört neben der Lufttemperatur (speziell der Minimumtemperatur) die sog. Feuchttemperatur. Während die Lufttemperatur mit einem trockenen Temperatursensor gemessen wird ( $T_{L,t}$ ), erfolgt die Bestimmung der Feuchttemperatur ( $T_{L,f}$ ) mit einem feuchtgehaltenen Messfühler. Er ist der Verdunstungsabkühlung unterworfen, so dass  $T_{L,f}$  kleiner oder gleich  $T_{L,t}$  ist.

Häufig wird die Feuchttemperatur anstelle der Trockentemperatur als Entscheidungskriterium dafür herangezogen, ob und wann eine Frostschutzberechnung erfolgen sollte. Abbildung 6.7.12 veranschaulicht den Tagesgang beider Größen während einer kühlen Witterungsphase Anfang Mai 2011 (siehe hierzu auch Ausführungen von Köpcke, 2012). Die für die graphische Darstellung ausgewählte Messstation Bremervörde liegt ca. 30 km südwestlich des Alten Landes, dem größten deutschen Obstanbaugebiet. Die Trockentemperatur in 2 m Höhe über Gras lag in den Morgenstunden des 3. Mai

bei  $-1\text{ °C}$  und des 5. Mai bei  $-2\text{ °C}$ . Die Feuchttemperatur in 2 m Höhe zeigte aufgrund der recht hohen nächtlichen relativen Luftfeuchte, die zeitweise auf über 90 % stieg, keinen wesentlichen Unterschied zur Trockentemperatur (diese kann seitens der Feuchttemperatur nur in einer lufttrockenen Atmosphäre deutlich unterschritten werden, was sich in Abbildung 6.7.12 allein während der Tageslichtstunden offenbart).

Abbildung 6.7.12 enthält neben den Trocken- und Feuchttemperaturen zusätzlich die berechnete Temperatur eines vollständig benetzten Blattes. Die Blatttemperatur wurde auf Basis verschiedener zeitgleich an der Station gemessener Größen simuliert (Strahlung, Wind, Lufttemperatur, relative Luftfeuchte). Infolge der Verdunstungsabkühlung besitzt das Blatt eine wesentlich niedrigere Temperatur als die Luft. Aufgrund des deutlichen Unterschreitens der Nullgradschwelle deutet sich gemäß Tabelle 6.7.6 die Notwendigkeit einer Frostschutzberechnung für die Nachtstunden des 2./3. und 4./5. Mai an.

Eine Frostschutzberechnung erfolgt stets mit dem Ziel, ein Absinken der Temperatur oberirdischer Pflanzenteile auf zerstörerisch wirkende Temperaturbereiche zu verhindern. Während des Gefrierprozesses des Wassers werden 333 kJ/kg an Gefrierwärme frei. Diese Gefrierwärme ist die Wärmequelle, die während einer Frostschutzberechnung Frostschäden im Bereich der Baumkronen verhindern kann, indem sie die Temperatur des Eis-Wasser-Gemisches auf  $0\text{ °C}$  hält. Hierzu muss das Berechnungswasser entweder kontinuierlich oder in Intervallen zugeführt werden.

In beiden Fällen (Dauer- oder Intervallberechnung) hat sich die Wahl der stündlich verabreichten Wassermenge nach der

Tab. 6.7.6: Kritische Temperaturbereiche bei Spätfrost mit zu erwartenden Schäden an verschiedenen Vegetationsorganen (aus Gömann et al., 2015, Tab. 3.6). Die Temperaturangaben beziehen sich auf die Trockentemperatur in 2 m Messhöhe.

Phase	Temperatur (in °C)
Grüne Spitzen	$\leq -7$
Rote Knospen	$\leq -2$
Vollblüte	$\leq 0$

zu tolerierenden Tiefsttemperatur der Pflanzenoberfläche (siehe Tab. 6.7.6) und nach den aktuellen mikrometeorologischen Prozessen (z. B. des zeitlichen Verlaufs der Abkühlung) zu richten. Andernfalls würde nach dem vollständigen Gefrieren des Wasserfilms die Blatttemperatur auf die Feuchttemperatur des Eises absinken und möglicherweise die Nullgradschwelle deutlich unterschreiten. Bei schwachem Frost sind in der Regel Beregnungsmengen von 2 mm pro Stunde ausreichend.

Dass die Pflanzenteile im Inneren der Eisschicht von der Erstarrungswärme des Beregnungswassers weiterhin profitieren, liegt daran, dass Eis Wärme viermal schneller leitet als Wasser (2.2 gegenüber 0.6 W/(m K) bei 0 °C, siehe auch Tab. 3.1).

### 6.7.4 Pflanzenkrankheiten: Apfelschorf

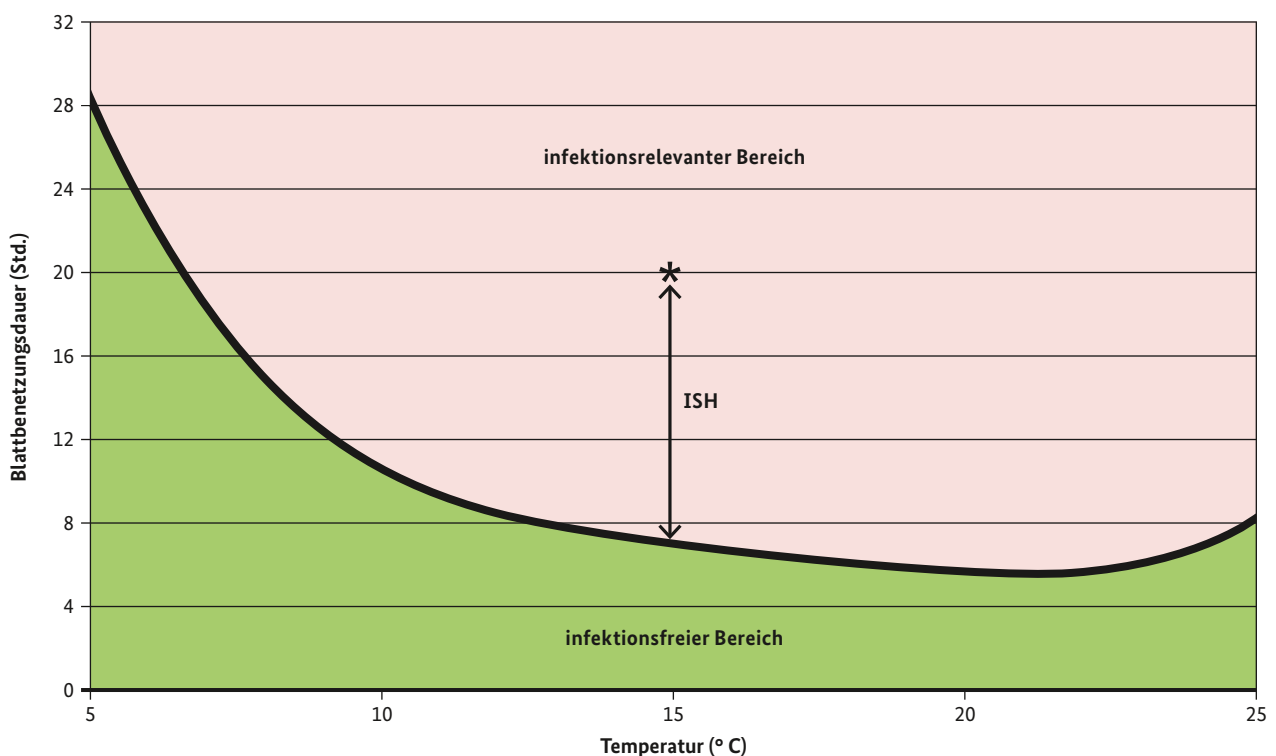
Unter den Pilzkrankheiten an Obst nimmt der Apfelschorf (*Venturia inaequalis*) weltweit die wichtigste Position ein. Hierbei handelt es sich um eine Erkrankung, die sich in Form zweier aufeinanderfolgender Erregergenerationen (Ascosporen, Konidien) über die gesamte Vegetationszeit erstrecken kann.

Die im letztjährigen Falllaub überwinterten Ascosporen werden bei regnerischem Wetter aus den Sporenbehältern geschleudert und gelangen durch Windbewegung auf die Blätter.

Dort keimen die Sporen aus und beginnen in das Blattgewebe einzudringen. Während dieses Vorgangs benötigen die Sporen regen- oder taubedingte Blattnässe. Die Eindringzeit der Pilzfäden in das Blatt – und damit der Infektionserfolg – hängt maßgeblich von der Vitalität der Sporen und damit von der Temperatur ab. Daher lässt sich der Infektionserfolg bzw. -nichterfolg durch zwei Kontrollparameter beschreiben: die Blattbenetzungsdauer und die mittlere Lufttemperatur während der Benetzungszeit. Die Grenze zwischen Erfolg/ Misserfolg wurde erstmals von Mills (1944) beschrieben und von MacHardy und Gadoury (1989) für den Fall der Ascosporenfektion korrigiert. Sie lässt sich als Infektionskurve darstellen. (Abb. 6.7.13).

Liegt die beobachtete Kombination aus Benetzungsdauer und Lufttemperatur oberhalb der Infektionskurve, so ist mit einer Infektion zu rechnen. Falls gegen den Erreger nicht vorgegangen wird, bildet sich nach einer zwei- bis dreiwöchigen Inkubationszeit ein bräunlicher Pilzrasen auf den infizierten Blättern, aus dem die zweite Sporengeneration, die der Konidien, hervorgeht. Deren Ausschüttung erfolgt in den Sommermonaten ebenfalls bei regnerischem Wetter. Gelangen die Konidien auf die benachbarten Blätter bzw. jungen Früchte und lassen Benetzungsdauer und Temperatur gemäß einer ähnlichen Infektionskurve eine Infektion zu, werden dort vergleichbare Befallssymptome auftreten. Das durch braun-schwärzliche Flecken verunstaltete und daher schwer verkäufliche Obst führt zwangsläufig zu Ertragsausfällen.

Abb. 6.7.13: Infektionskurve nach MacHardy und Gadoury (1989), die den infektionsfreien von dem infektionsbegünstigten Parameterbereich trennt. Der als Beispiel eingezeichnete Stern symbolisiert eine bei ca. 15 °C vorgefundene Benetzungsdauer, die ca. 13 Stunden oberhalb der Infektionsschwelle liegt und damit „ISH = 13 Stunden“ definiert (s. Text).



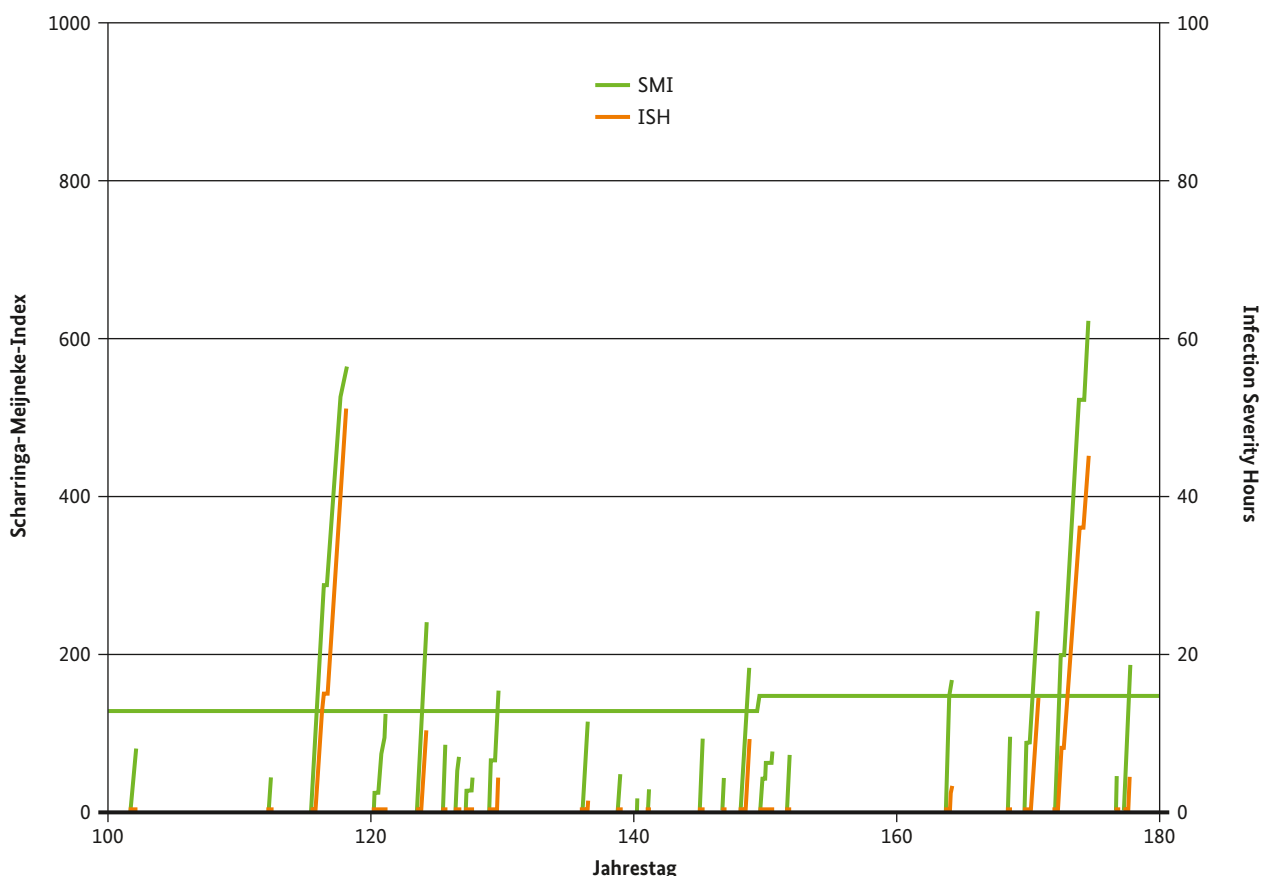
Der DWD bietet Prognosen der tau- und niederschlagsinduzierten Blattbenetzungsdauer und der potenziellen Infektionszeiträume an (Wittich, 1996), basierend auf den Infektionskurven von MacHardy und Goudury (1989) für Ascosporeninfektionen im Frühjahr und Schwabe (1980) für Konidieninfektionen im Sommer (hier nicht dargestellt). Beide Kurven beschreiben die erforderliche Mindestblattbenetzungsdauer, die der Pilz für das Eindringen in das Blattgewebe unter verschiedenen Temperaturbedingungen benötigt. Das Modell gibt sogenannte Infection Severity Hours (ISH) aus, d. h. die Anzahl der infektionsgünstigen Stunden oberhalb der Infektionskurve bzw. oberhalb der erforderlichen Mindestbenetzungsdauer. Je höher die Anzahl dieser Stunden ist, umso höher ist die Gefährdung. Zudem wird der Scharringa-Meijneke-Index (SMI) als Produkt aus Blattbenetzungsdauer und zeitgleicher Mitteltemperatur berechnet.

Oberhalb einer Schwelle von SMI = 127 ist bis Ende Mai mit Ascosporen-Infektionen, oberhalb von SMI = 146 ab Juni mit Konidien-Infektionen zu rechnen (Abb. 6.7.14). Auch hier gilt: je deutlicher die Schwellenwerte überschritten werden, umso wahrscheinlicher tritt eine Infektion ein und umso stärker kann die Infektion ausfallen.

Das ursprüngliche Infektionsmodell nach Mills (1944) wurde in England durch das VENTEM und in Deutschland durch das Welte- und RIM-Modell (RIM = Relatives Infektionsmaß) aktualisiert.

Die Schorfwarndienste der regionalen Pflanzenschutzdienste warnen besonders im Frühjahr, dem Zeitraum schnellen Blattzuwachses und heranreifender Ascosporen, in Verbindung mit bevorstehenden Niederschlägen und ausreichend hohen Temperaturen vor Schorfinfektionen. Ausgegangen wird von einem maximalen Ascosporenpotential von 100 % im Winter, das sich langsam abbaut, bis das Risiko einer bodenbürtigen (primären) Schorfinfektion mit einem Ascosporenpotential von weniger als 5 % etwa Ende Mai zu Ende geht. Durch das stufenweise Ausreifen der Sporen können über einen längeren Zeitraum immer wieder Infektionen auf den Blättern auftreten.

**Abb. 6.7.14:** Simulation der Ascosporen- und Konidieninfektion für die Jahrestage 100 bis 180 (10. April bis 29. Juni) 2015, DWD-Station Braunschweig. Die horizontale grüne Linie gibt die SMI-Warnschwelle für Ascosporen- bzw. Konidien-Infektionen an.  
Hinweis: In der Obstbauregion des Alten Landes an der Niederelbe kam es im Zeitraum 25.-27.4.2015 (Jahrestag 115 - 117) zur schwersten Schorfinfektion der Saison (Weber und Kruse, 2016), so dass sich die hier dargestellten Ergebnisse (SMI = 564, ISH = 51) trotz der räumlichen Stationsentfernung von ca. 160 km bestätigen lassen.



## Literatur

Anderson, J.L., Richardson, E.A., Kesner, C.D. (1986): Validation of chill unit and flower bud phenology models for 'Montmorency' sour cherry. *Acta Horticulturae (ISHS)* 184, 71-78.

Blanke, M.M., Gebauer, J. und E. Luedeling (2012): Pflanzen im Winter schlafen nicht.- Vermindert der Klimawandel den Kältereiz für Obstgehölze? - Bioinformatik -Praxis der Naturwissenschaften – Biologie „Pflanzen im Winter“, Heft 8/61, 4-10.

Blanke, M. M. und Kunz, A. (2009): Auswirkungen rezenter Klimaveränderungen auf die Phänologie von Kernobst am Standort Klein-Altendorf. *Erwerbs-Obstbau* 51 (3), 101-114 (Ausgabe zum Klimawandel).

Fishman, S., Erez, A. und Couvillon, G.A., (1987): The temperature dependence of dormancy breaking in plants: Mathematical analysis of a two-step model involving a cooperative transition. *Journal of Theoretical Biology* 124 (4), 473-483.

Gömann, H., Bender, A., Bolte, A., Dirksmeyer, W., Englert, H., Feil, J.-H., Frühauf, C., Hauschild, M., Krengel, S., Lilienthal, H., Löpmeier, F.-J., Müller, J., Mußhoff, O., Natkhin, M., Offermann, F., Seidel, P., Schmidt, M., Seintsch, B., Steidl, J., Strohm, K., Zimmer, Y. (2015): Agrarrelevante Extremwetterlagen und Möglichkeiten von Risikomanagementsystemen: Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL); Abschlussbericht: Stand 3.6.2015. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 312 p, Thünen Rep 30, doi:10.3220/REP1434012425000.

Kaufmann, H. und Blanke, M.M. (2016): Changes in chilling availability in the Meckenheim fruit growing region using cherry as a model crop. *Regional Environmental Change* 17, 00-00 .DOI 10.1007\_s10113-016-1064-6

Köpcke, D. (2012): Erfolgreicher Frostschutz unter Berücksichtigung der thermodynamischen Prozesse in Obstanlagen. *Mitt. OVR* 67(04), 136-143.

Landsberg, J.J. (1974): Apple fruit bud development and growth; analysis and an empirical model. *Ann. Bot.* 38, 1013-1023.

Legave, J.-M., Blanke, M. M., Christique, D., Giovannini, D., Matthieu, V., Oger, R. (2013): A comprehensive overview of the spatial and temporal variability of apple bud dormancy release and blooming phenology in Western Europe. *International Journal of Biometeorology* 57, 317-331.

Luedeling, E., Kunz, A. und Blanke, M.M. (2011): Mehr Chilling für Obstbäume in wärmeren Wintern? *Erwerbs-Obstbau* 53 (4), 145-155.

MacHardy, W.E., Gadoury, D.M. (1989): A revision of Mills' criteria for predicting apple scab infection periods. *Phytopathology* 79, 304-310.

Mills, W.D. (1944): Efficient use of sulfur dusts and sprays during rain to control apple scab. *N.Y State College of Agriculture, Ext. Bull.* 630.

Richardson, E. A., Seeley, S.D. und Walker, D. R., (1974): A model for estimating the completion of rest for Redhaven and Elberta peach trees. *Hort. Science* 9 (4), 331-332.

Schwabe, W.F.S. (1980): Wetting and temperature requirements for apple leaf infection by *Venturia inaequalis* in South Africa. *Phytophylactica* 12, 69-80.

Weinberger, J. H. (1950): Chilling requirements of peach varieties. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.* 56, 122-128.

Weber, R.W.S., Kruse, P. (2016): Spät- und Lagerschorf an Äpfeln an der Niederelbe 2015. *Mitt. OVR* 71(05), 126-131.

Wittich, K.-P. (1996): Prognose des Apfelschorfes: Verifikation des Mills-Schemas und Beschreibung des AMBER-Moduls ASCHORF. DWD-intern, 67, Beiträge zur Agrarmeteorologie 1/96.

## 6.8 Weinbau

Autoren: Beate Berkelmann-Löhnertz, Cathleen Frühauf, Gottfried Bleyer, Hans R. Schultz

### 6.8.1 Bestandsklima

Weinreben werden in Deutschland vor allem auf klimatisch begünstigten Hängen (Ausrichtung nach Südost, Süd oder Südwest) angebaut. Die Globalstrahlung ist wichtig für die Photosynthese der Reben und gleichzeitig von entscheidender Bedeutung für die Ausbildung eines Bestandsklimas. Die für eine optimale Photosyntheseleistung von Reben notwendige Bestrahlungsstärke wird bereits an bedeckten Tagen erreicht. Für den Wärmehaushalt des Bestandes hat die Globalstrahlung als Energiequelle eine große Bedeutung. Erst durch das Einwirken der Strahlungsenergie bei gleichzeitig geringen Windgeschwindigkeiten kann sich im Bestand ein spezielles Mikroklima mit höheren Temperaturen als außerhalb ausbilden. Durch dieses Zusammenspiel erreichen Rebbestände in Deutschland häufig und über längere Perioden annähernd optimale Temperaturen.

Am eindimensionalen Modell BEKLIMA (Braden, 1995, siehe auch Bestandsklima, Mikroklima in Pflanzenbeständen und Bodenklima unter [http://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/ku\\_beratung/landwirtschaft/agrар\\_modelle/agrarmeteorologische\\_modelle.html](http://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/ku_beratung/landwirtschaft/agrар_modelle/agrarmeteorologische_modelle.html)) wurden Änderungen und Erweiterungen vorgenommen, damit die Berechnung bestandsklimatischer Größen für die Reihenkultur der Weinrebe erfolgen konnte. Zur Validierung der Modellergebnisse erfolgten umfangreiche Messungen in einem Rebbestand (Abb. 6.8.1).

Zusätzlich wurden in den Jahren 2004 und 2005 jeweils über 24 Stunden Messungen mit einer Infrarot-Kamera durchgeführt. Abbildung 6.8.2 zeigt die in Nord-Süd-Richtung verlaufenden Rebzeilen als IR-Bild und als Foto. In den markierten Bereichen wurde die Oberflächentemperatur gemittelt, wobei zwischen besonnener und unbesonnener Laubwand und dem Boden unterschieden wurde.

Deutlich sind in Abbildung 6.8.3 die Unterschiede in den Oberflächentemperaturen zwischen der besonnenen und der unbesonnenen Laubwand (blau und rot) zu erkennen. Während der Messungen an einem Strahlungstag konnten Differenzen in den mittleren Oberflächentemperaturen von bis zu 5 K beobachtet werden. Tagsüber lagen die Oberflächentemperaturen der Blätter über den Werten für die Lufttemperatur in 2 m Höhe. Nach Sonnenuntergang allerdings kühlten die Blattoberflächen schnell ab und waren demzufolge in der Nacht kälter als die darüber liegende Luftschicht.

Im Modell wird nicht zwischen besonnener und unbesonnener Laubwand unterschieden. Einen Vergleich mit den Modell-

ergebnissen zeigt die Grafik in Abbildung 6.8.4. Die Übereinstimmung kann als befriedigend angesehen werden. Am Nachmittag des ersten und am Vormittag des darauffolgenden Tages stimmen die Berechnungen gut mit den gemessenen Oberflächentemperaturen der jeweils besonnenen Laubwand überein. Auch die modellierten Werte für die Nacht geben gut die Verhältnisse wieder. Die größten Abweichungen treten in den Mittagsstunden auf. Eine mögliche Ursache hierfür kann die Ausrichtung der IR-Kamera sein, da durch den seitlichen Blick auf die Laubwand aus Richtung Nord nur ein Teil der besonnenen Blätter erfasst wurde und deshalb der Anteil der im Schatten liegenden Blätter größer war. Bei dem verwendeten Flächenmittel könnte somit ein zu großer Anteil an im Schatten liegenden Blättern berücksichtigt worden sein, da die Sonne zu diesem Zeitpunkt direkt über der Laubwand stand und nur die Blätter im oberen Teil der Laubwand voll besonnt waren.



Abb. 6.8.1: Messanordnungen im Rebbestand (Geisenheim, Weinbergslage „Mäuerchen“), Fotos: C. Frühauf, DWD-ZAMF.

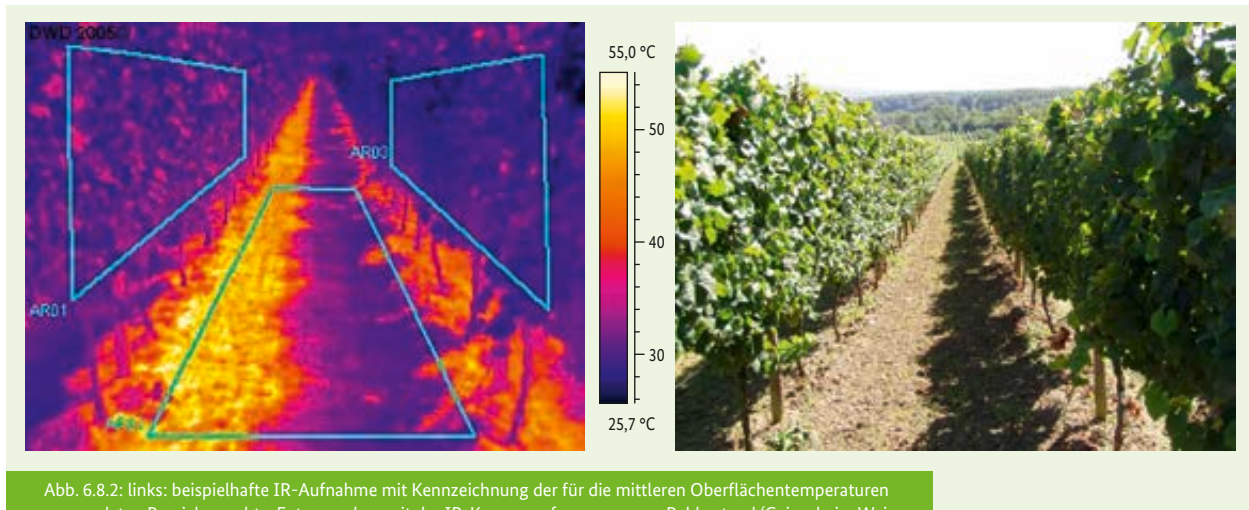
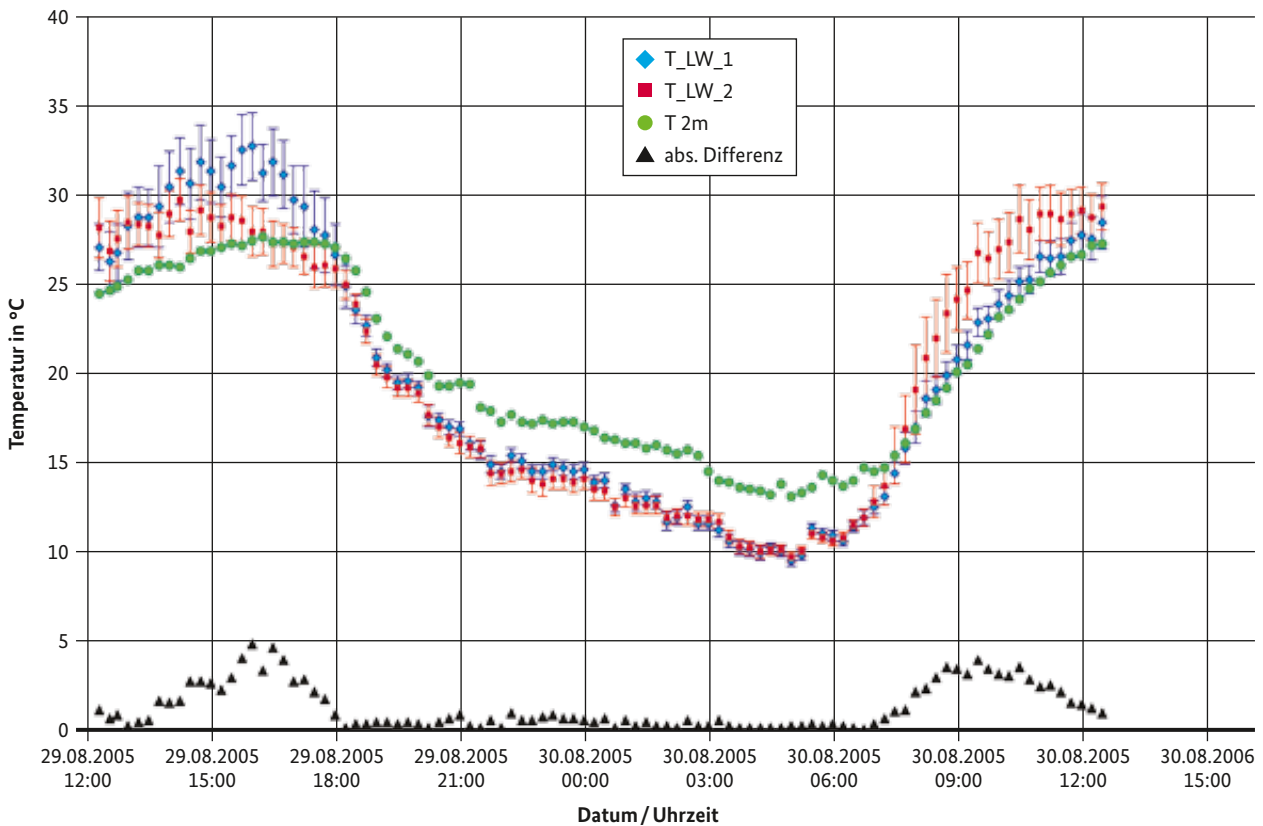


Abb. 6.8.2: links: beispielhafte IR-Aufnahme mit Kennzeichnung der für die mittleren Oberflächentemperaturen verwendeten Bereiche, rechts: Foto von dem mit der IR-Kamera aufgenommenen Rebbestand (Geisenheim Weinbergslage „Mäuerchen“, Blick Richtung Süden), IR-Bild: K.-P. Wittich, Foto: C. Frühauf, beide DWD-ZAMF.

Abb. 6.8.3: Verlauf der mittleren Oberflächentemperaturen und der auftretenden absoluten Differenz zweier unterschiedlich orientierter Laubwände ( $T_{LW_1}$ ,  $T_{LW_2}$ ; Momentanwert alle 15 Minuten) im Vergleich zur Lufttemperatur in 2 m Höhe ( $T_{2m}$ , 15 Minuten-Mittelwert) an einem Strahlungstag (Berkelmann-Löhnertz et al., 2005)



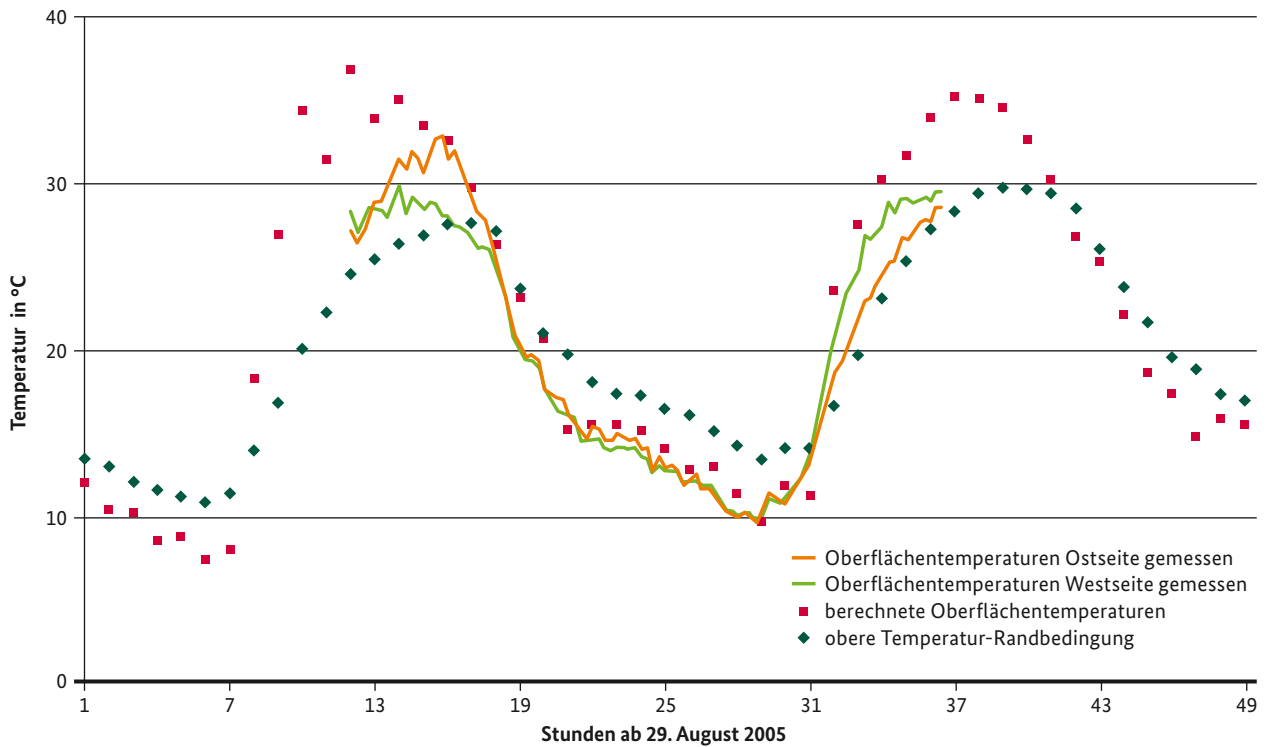
### 6.8.2 Blattflächenmodell

Mit dem Blattflächenmodell (Schultz, 1992, Schultz, 2003) werden das Wachstum und die Blattflächenentwicklung der Rebe auf physiologischer Basis beschrieben, um Blattzuwachs und Krankheitsprognose zu koppeln. In vielen

Modellen dienen Temperatursummen zur Beschreibung der Pflanzenentwicklung. So wird für das Blattflächenmodell nur die am einfachsten zugängliche Klimagröße Temperatur ( $T_{max}$ ,  $T_{min}$ ) als Eingangsgröße benötigt. Darüber hinaus wird lediglich die phänologische Beobachtung des Austriebs als Startwert herangezogen, um sortenspezifische Unterschiede in der Voraustriebsphase auszuschließen.



**Abb. 6.8.4: Berechnete und gemessene Oberflächentemperaturen der Laubwand am 29. und 30. August 2005 (2 m Temperatur als obere Temperaturrandbedingung) (Berkelmann-Löhnertz et al., 2005)**



Das Modell berücksichtigt (Schultz, 2003):

- ausschließlich Haupttriebe;
- Rebsorten Riesling, Müller-Thurgau und Spätburgunder;
- Erziehungssystem; es wird zwischen aufrechten Systemen (Spalier, Vertiko) und hängenden Systemen (Umkehrerziehung) unterschieden, da sich die Trieb- und Blattflächenentwicklung unterscheidet;
- Position am Trieb; sie gibt die von den Blättern zu erreichende Endgröße vor. Jedes Blatt wird in seiner Entwicklung einzeln modelliert, da die physiologische Endgröße positions- und altersabhängig ist;
- physiologisches Blattalter und Triebentwicklung; diese Parameter werden durch das sog. Plastochron- bzw. Phyllochronsystem beschrieben. Ein Plastochron ist der physiologische Zeitabschnitt, der zwischen der Bildung zweier aufeinanderfolgender Blätter an der Triebspitze liegt (Erickson und Michelini, 1957). Dieser Zeitabschnitt ist abhängig von der Temperatur und der phänologischen Phase, in der sich die Rebe gerade befindet. Die Strahlung hat keinen Einfluss, so dass eine Unterscheidung zwischen Sonnen- und Schattentrieben nicht erforderlich ist.

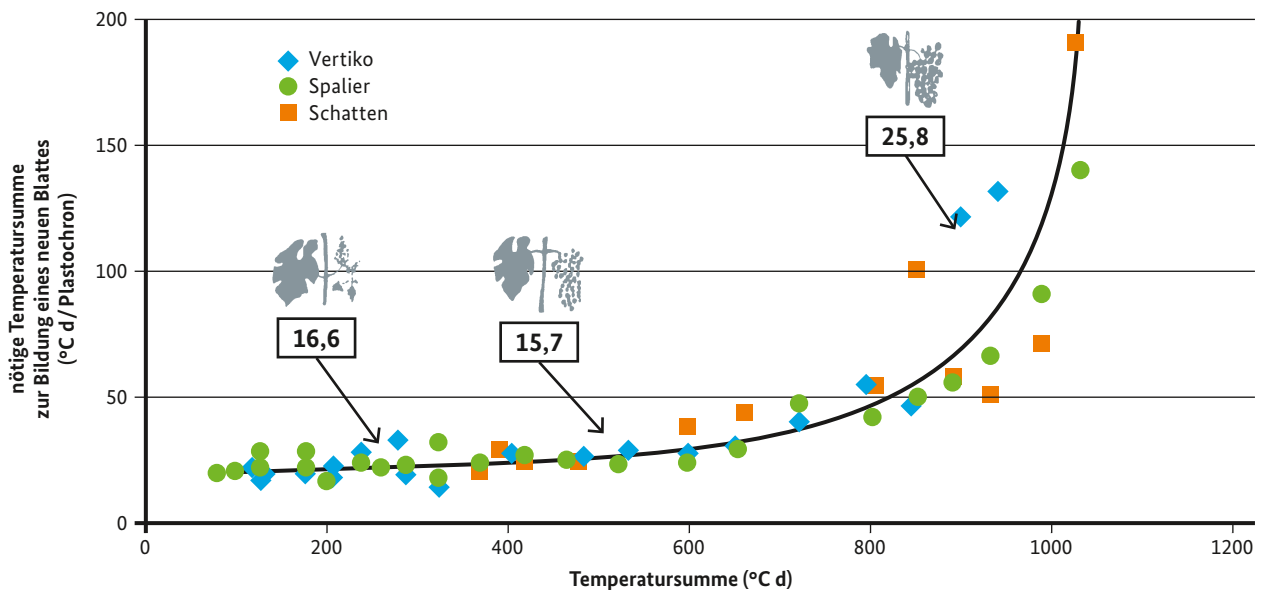
Für die Altersklassifizierung der Blätter erfolgt die Simulation der Blattflächenentwicklung von der Triebspitze aus zur Basis (Abb. 6.8.5). So erhält das jüngste Blatt, das die Referenzlänge von 30 mm überschreitet, immer die Nummer bzw. den Plastochronindex (PI) 1. Das bedeutet, dass durch die Neubildung eines Blattes an der Triebspitze, das nächst basal orientierte Blatt „numerisch altert“. Dieser Alterungsprozess wird auch dann simuliert, wenn, bedingt durch

einen Laubschnitt, keine neuen Blätter mehr am Haupttrieb gebildet werden. Der PI ist nicht ganz gleichzusetzen mit der Blattzahl, da er auch Stellen nach dem Komma berücksichtigt. Das Triebalter und damit die Entwicklung eines Rebtriebs werden demzufolge nicht in Tagen oder Wochen ausgedrückt, sondern in Plastochronen.

**Abb. 6.8.5: System zur Altersklassifizierung eines Rebtriebs und dessen Blätter (Plastochronsystem) (Schultz, 2003)**



**Abb. 6.8.6:** Erforderliche Temperatursumme zur Bildung neuer Blätter (Gradtage pro Plastochron) in Abhängigkeit vom phänologischen Stadium am Beispiel von Erziehungssystemen mit aufrechten Wuchsverhalten. Die Phänologie wird ebenfalls auf der Basis von Temperatursummen abgebildet (Schultz, 2003)



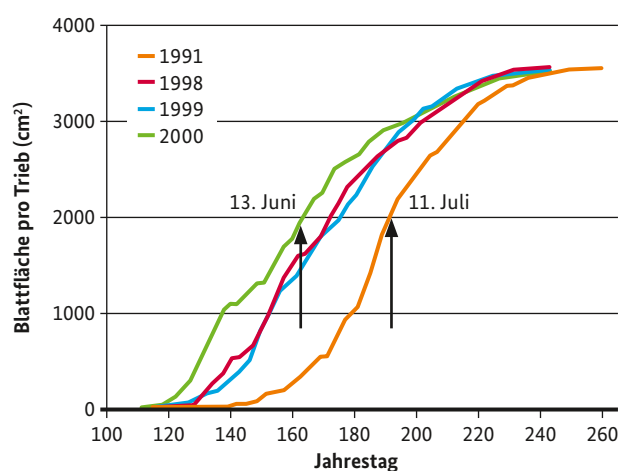
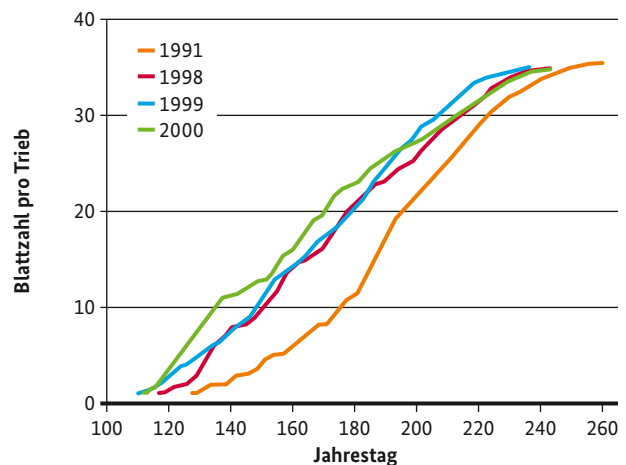
Ausgehend von einer Basistemperatur von 10 °C beschreibt die auflaufende Temperatursumme die Entwicklung der Blattzahl und der Blattfläche. Die Temperatursumme, die zur Bildung eines Blattes notwendig ist, steigt im Laufe der Vegetationsperiode an (Abb. 6.8.6), da durch Veränderungen der Verteilungsmuster von Photosyntheseprodukten und Änderungen der Tageslänge die vegetative Entwicklung der Rebe an Priorität verliert.

Die von den Blättern erreichte Endgröße hängt vom Bildungszeitpunkt ab. Einzelblätter erreichen, ausgehend vom Austrieb, nach einer abgelaufenen Temperatursumme von 100 bis 200 Gradtagen (°C d) die höchsten Einzelblattflächen. Grundsätzlich sind die erreichbaren Blattgrößen bei hängenden Trieben kleiner als bei aufrecht wachsenden.

Das Blattflächenmodell kann unterstützend zur besseren Terminierung von Pflanzenschutzmaßnahmen eingesetzt werden. Mit meteorologischen Vorhersagedaten ist die Berechnung des Zuwachses für die nächsten Tage möglich. So kann abgeschätzt werden, wann die neu zugewachsene ungeschützte Blattfläche so groß ist, dass eine weitere Pflanzenschutzmaßnahme notwendig wird. Bei kühler Witterung und schwachem Zuwachs kann der Abstand zwischen zwei Applikationen vergrößert werden. Bei höheren Temperaturen und starkem Zuwachs ist möglicherweise ein kürzerer Abstand nötig.

Das Modell wurde unter verschiedenen Klimabedingungen getestet und ist auf andere Weinbauggebiete übertragbar. Ein Beispiel für die großen Unterschiede zwischen einzelnen Jahrgängen und bei der Simulation der Triebentwicklung wird in Abbildung 6.8.7 gegeben.

**Abb. 6.8.7:** Berechnete Entwicklung der Blattzahl sowie der Blattfläche pro Trieb für die Witterungsverläufe der Jahre 1991, 1998, 1999, 2000. Als Eingabeparameter wurden nur der Tag des Austriebs und die täglichen maximalen und minimalen Temperaturen verwendet.



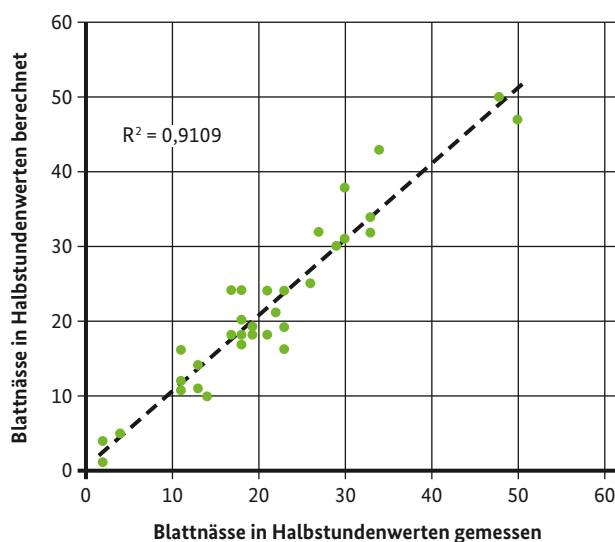
### 6.8.3 Blattnässemodell

Grundlage für die Erstellung des Blattnässemodells für Reben (Hoppmann, Wittich, 1997; siehe auch Blattbenetzung unter [http://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/ku\\_beratung/landwirtschaft/agrarmodelle/agrarmeteorologische\\_modelle.html](http://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/ku_beratung/landwirtschaft/agrarmodelle/agrarmeteorologische_modelle.html)) war ein Modell, das für Apfelbäume entwickelt wurde (Wittich, 1993). Der Modellierung sind umfangreiche Untersuchungen mit verschiedenen Blattnässe Sensoren unterschiedlicher Bauart und Messprinzipien vorausgegangen. Vergleichsmessungen bei Niederschlags- und Tauereignissen zeigten ein sehr unterschiedliches Verhalten der Sensoren mit – daraus resultierend – stark abweichenden Blattnässezeiten.

Da die Dynamik von Pflanzenkrankheiten in vielen Fällen maßgeblich von der Blattbenetzungsdauer beeinflusst wird, ist deren Kenntnis essentielle Voraussetzung für die Entwicklung von Modellen zur Vorhersage pilzlicher Erkrankungen. Umfangreiche Versuche mit künstlicher Benetzung und die Dokumentation des Abtrocknungsverhaltens waren Voraussetzung für die Anpassung des Modells an Rebstände (Abb. 6.8.8). Ein Penman-Monteith-Ansatz beschreibt den Wasserdampf-Transport am Blatt. Hierbei werden die Bestandsgeometrie und das Abtrocknungsverhalten in verschiedenen Laubwandzonen berücksichtigt.

Der gesamte Energiehaushalt des Blattes wird simuliert, so dass als Eingangsgrößen Lufttemperatur, relative Feuchte, Niederschlag, Windgeschwindigkeit, Globalstrahlung und die langwellige Gegenstrahlung der Atmosphäre (alternativ der Bedeckungsgrad) als Stundenwerte benötigt werden. Das Modell unterscheidet zwischen den Blattzuständen „trocken“, „Tau“, „Regen“ und „abtrocknend nach Regen“. Abbildung 6.8.9 zeigt die gute Übereinstimmung zwischen den modellierten Blattnässezeiten und den Messungen.

**Abb. 6.8.9: Vergleich der berechneten (Modell) mit gemessenen Blattnässezeiten (Blattnässe Sensor Fa. Lufft), Geisenheim, Weinberglage „Mäuerchen“, September 1995**



**Abb. 6.8.8: Blattbenetzung an Rebblättern, Foto: C. Frühauf, DWD-ZAMF**

### 6.8.4 Pilzliche Erkrankungen der Weinrebe

Im Weinbau führen insbesondere pilzliche Schaderreger zu großen wirtschaftlichen Schäden, die sich sowohl auf quantitativer als auch auf qualitativer Ebene zeigen. Um trotzdem hochwertiges Lesegut erzeugen zu können, ist beim Anbau der klassischen, pilzanfälligen Rebsorten ein hoher Fungizideinsatz erforderlich.

Die Regeln zur Durchführung von Pflanzenschutzmaßnahmen sowie die Vorgaben zur Begrenzung der Anwendung von Pflanzenschutzmitteln auf das notwendige Maß sind im Pflanzenschutzgesetz festgeschrieben. Kernstück des Gesetzes ist der sogenannte Integrierte Pflanzenschutz. Dieser besagt, dass biologische, biotechnische, pflanzenzüchterische sowie anbau- und kulturtechnische Maßnahmen vorrangig berücksichtigt werden sollen, bevor der chemische Pflanzenschutz zum Einsatz kommt. Ziel dieser flankierenden Maßnahmen ist es, möglichst ungünstige Entwicklungsbedingungen für die Schaderreger zu schaffen bzw. deren Schadwirkung zu reduzieren. Ein weiterer wesentlicher Teil des Pflanzenschutzgesetzes ist die Festschreibung eines Aktionsplans zur nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln. Hier werden quantitative Vorgaben, Ziele, Maßnahmen und Zeitpläne zur Verringerung der Risiken und Auswirkungen der Anwendung von synthetisch-organischen sowie anorganischen (z. B. Kupfer) Pflanzenschutzmitteln auf die Gesundheit von Mensch und Tier sowie auf den Naturhaushalt formuliert. Gleichzeitig werden Pfade zur Umsetzung skizziert.

Wesentlicher Bestandteil des integrierten Pflanzenschutzes ist die Nutzung agrarmeteorologischer Modelle. Dieser Baustein ist bei der Dauerkultur Rebe von besonderer Bedeutung, da einige der für annuelle Kulturen geltenden Ele-

mente im Weinbau nicht anwendbar sind (z. B. Umsetzung phytosanitärer Aspekte bei der Gestaltung der Fruchtfolge oder Sortenwechsel). Auch wenn das Einsparpotential an Pflanzenschutzmitteln im Weinbau nicht so groß ist wie bei ackerbaulichen Kulturen, so kann der Anteil gesunden Lesegutes und damit die Traubenqualität durch die Nutzung von Krankheitsmodellen als Entscheidungshilfe beim Rebschutz enorm gesteigert werden.

Zu den wirtschaftlich wichtigen pilzlichen Schadorganismen der Rebe zählen *Plasmopara viticola*, der Erreger des Falschen Mehltaus, und *Erysiphe necator*, Verursacher des Echten Mehltaus. Beide Pathogene sind extrem virulente, polyzyklische Pilze, die viele Infektionszyklen in einer Vegetationsperiode durchlaufen können. Dementsprechend erfordert die Eindämmung dieser Schadpilze einen sehr hohen Fungi-

zideinsatz. So liegt bei der Kultur „Wein“ der so genannte Behandlungsindex für die Gruppe der Fungizide in verschiedenen Studien stets über dem Wert 10 und nimmt damit im Vergleich verschiedener ackerbaulicher Kulturen und einiger Spezialkulturen direkt nach dem „Apfel“ die zweite Stelle in der Rangfolge ein (Roßberg, 2013).

#### 6.8.4.1 Falscher Mehltau

In der weinbaulichen Praxis wird der Falsche Mehltau, hervorgerufen durch *Plasmopara viticola* (Abb. 6.8.10), meistens mit dem ursprünglichen Gattungsnamen des Pilzes – *Peronospora* – bezeichnet.



Abb. 6.8.10: Typische Befallsbilder hervorgerufen durch *Plasmopara viticola*; oben: Läsionen auf Weinblättern, sogenannte Ölflecke (links) und Nekrotisierung des Blattgewebes (rechts); unten: früher Gescheinsbefall (links) und Lederbeeren (rechts), Fotos: Hochschule Geisenheim University

Bereits im Jahr 1914 wurde von Karl Müller der Inkubationskalender für den Peronospora-Vorhersagedienst in Baden entwickelt und an die Winzer verteilt. Mit dem Inkubationskalender war es erstmals möglich, die Rebenperonospora vorherzusagen und gezielt zu bekämpfen. Karl Müller, der erste Direktor des Staatlichen Weinbauinstituts, forschte intensiv an der Rebenperonospora weiter, so dass seine Arbeiten später als Basis für die Entwicklung von Modellen dienen konnten. Grundlage für alle Krankheitsmodelle sind mathematische Funktionen, die die Biologie der Schaderreger mit den Wetterdaten in Beziehung setzen. Somit ist die Inkubationszeitkurve von Müller und Sleumer (1934) ein wesentlicher Teil der Peronospora-Prognose.

In den 90er Jahren führte *P. viticola* zu großen wirtschaftlichen Verlusten im deutschen Weinbau. In diesen Jahren wurde bereits mit einem Prognosemodell gearbeitet, welches allerdings ausschließlich die Sekundärinfektionen des Schadpilzes abbildete (Hill, 1989 a, b). Auf der Basis genetischer Untersuchungen zur Biologie von *P. viticola* und zur Epidemiologie des Falschen Mehltaus (Ölflecken-Monitoring) wurde in den frühen 2000er Jahren dargelegt, dass im Frühjahr nicht nur eine einzige bodenbürtige Infektion – die sogenannte Primärinfektion – stattfindet, sondern dass grundsätzlich weitere Infektionen vom Boden ausgehend möglich sind und zwar bis in den Juli hinein (Loskill et al., 2005, 2007). Als Transportpfade der beweglichen Sporen (Zoosporen) vom Boden in die Laubwand wurden Splashtropfen identifiziert,

die insbesondere bei Starkregen in großen Mengen entstehen. Aufgrund dieser Erkenntnisse wurde die Notwendigkeit deutlich, das vorhandene Prognosemodell entsprechend zu erweitern (Berkelmann-Löhnertz et al., 2006; siehe auch Reben-Peronospora unter: [http://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/ku\\_beratung/landwirtschaft/agrar\\_modelle/agrarmeteorologische\\_modelle.html](http://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/ku_beratung/landwirtschaft/agrar_modelle/agrarmeteorologische_modelle.html)).

### Reifung und Keimung der Wintersporen

Grundsätzlich können bodenbürtige Infektionen durch *P. viticola* nur dann stattfinden, wenn die Wintersporen (Oosporen) ausgereift sind. Diese stammen aus dem sporentragenden Falllaub vom Herbst des Vorjahres (Abb. 6.8.11). Entscheidend für die Länge dieser winterlichen Reifephase sind die Hauptwachstumsparameter Bodentemperatur und Bodenfeuchte. Erst nach Abschluss der Reifephase befinden sich in den obersten Schichten des Bodens keimbereite Oosporen. Der zweite wichtige Entwicklungsschritt betrifft das Auskeimen der Oosporen. Bei Vorliegen ausreichend feuchter Bedingungen im sporentragenden Oberboden entwickelt sich aus der Winterspore zunächst ein Sporenbehälter. In diesem (Primär-)Sporangium werden mehrere Zoosporen (Schwärmersporen) differenziert. Nachdem auch diese beweglichen Sporen eine Reifezeit durchlaufen haben, werden sie als infektiöse Zoosporen entlassen. Im Idealfall liegen diese Vermehrungseinheiten in einer „Wasserpfütze“ auf dem Boden vor. Sie sind mit zwei Geißeln ausgestattet und somit in der Lage, in einer Flüssigkeit zu schwimmen (Abb. 6.8.12).



Abb. 6.8.11: Wintersporen (Oosporen) in infizierten Blättern (Vergrößerung links: 200fach, rechts: 400fach; Aufnahme mit Leitz-Mikroskop Keyence Biozero BZ-8000K, Anfärbung mit Coomassie-Blue), Fotos: H. Findeis, Hochschule Geisenheim University

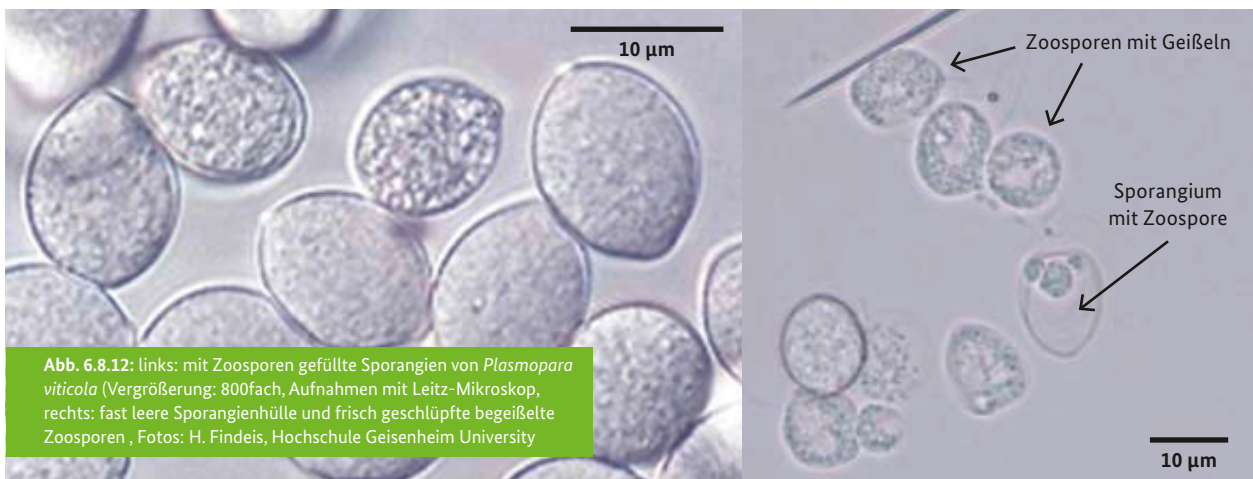


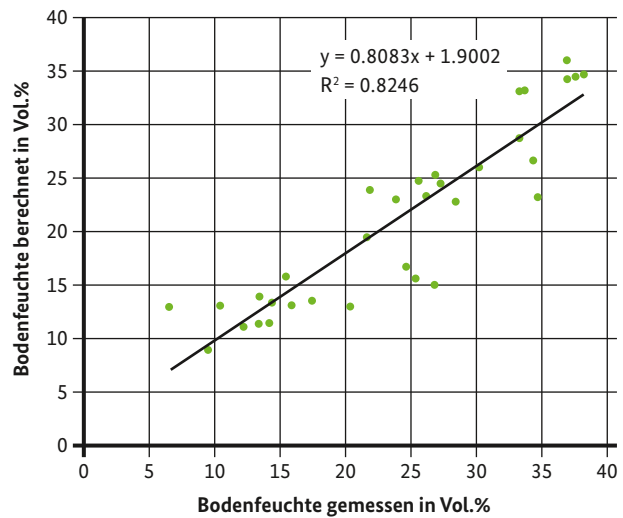
Abb. 6.8.12: links: mit Zoosporen gefüllte Sporangien von *Plasmopara viticola* (Vergrößerung: 800fach, Aufnahmen mit Leitz-Mikroskop, rechts: fast leere Sporangienhülle und frisch geschlüpfte begeißelte Zoosporen, Fotos: H. Findeis, Hochschule Geisenheim University

Um diese beiden wichtigen Grundvoraussetzungen für die erste bodenbürtige Infektion abzubilden, wurde ein Sporenbilanzmodell zur Vorhersage der Keimdauer der Oosporen im Boden entwickelt. Bezüglich der Bildung und Entlassung von Zoosporen aus den (Primär-)Sporangien sind der Wassergehalt und die Temperatur im sporentragenden Oberboden von Bedeutung. Aus diesem Grunde wurde das bereits beschriebene Bestandsklimamodel (vgl. Kapitel 6.8.1) verwendet, mit dem diese Parameter berechnet werden können. Die modellmäßige Anpassung des vorhandenen Bestandsklimamodels BEKLIMA an Rebbestände wurde vom Zentrum für Agrarmeteorologische Forschung in Braunschweig durchgeführt.

#### Modellierung der Verhältnisse in der obersten Bodenschicht

Die Kenntnis der Bodenparameter ist Voraussetzung, um Bodenfeuchte und Bodentemperatur genau nachzubilden zu können (Kapitel 4.3.1), da durch sie der Wassertransport und die Wärmeleitung beeinflusst werden. Für die Entwicklung der Sporangien sind die Verhältnisse in den obersten 5 cm des Bodens entscheidend. Abbildung 6.8.13 zeigt den Vergleich zwischen der gravimetrisch im Weinberg bestimmten Bodenfeuchte und den für denselben Tag modellierten Werten. Böden sind meist inhomogen. Erfolgt die Messung der Bodenfeuchte an verschiedenen Stellen, so ergeben sich leicht unterschiedliche Werte. Im Weinberg wurde in regelmäßigen Abständen eine Bodenbearbeitung durchgeführt. Die oberste Bodenschicht wurde aufgelockert und so die Bedingungen für den Wassertransport verändert.

Abb. 6.8.13: Vergleich der gemessenen und berechneten Bodenfeuchte in der Schicht 0 bis 5 cm im Jahr 2005 (Berkelmann-Löhnertz et al., 2005)



Im Modell (siehe Bodenklima unter [http://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/ku\\_beratung/landwirtschaft/agrar\\_modelle/agrarmeteorologische\\_modelle.html](http://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/ku_beratung/landwirtschaft/agrar_modelle/agrarmeteorologische_modelle.html)) konnten die durch die Bearbeitung veränderten physikalischen Bedingungen nicht mit einbezogen werden. Unter Berücksichtigung all dieser Einschränkungen zeigten die Daten eine zufriedenstellende Übereinstimmung zwischen der Modellierung und den Messungen (Abb. 6.8.14).

Abb. 6.8.14: Vergleich der berechneten und gemessenen Bodenfeuchte in der Schicht 0 bis 5 cm im Jahr 2005 (Berkelmann-Löhnertz et al., 2005)

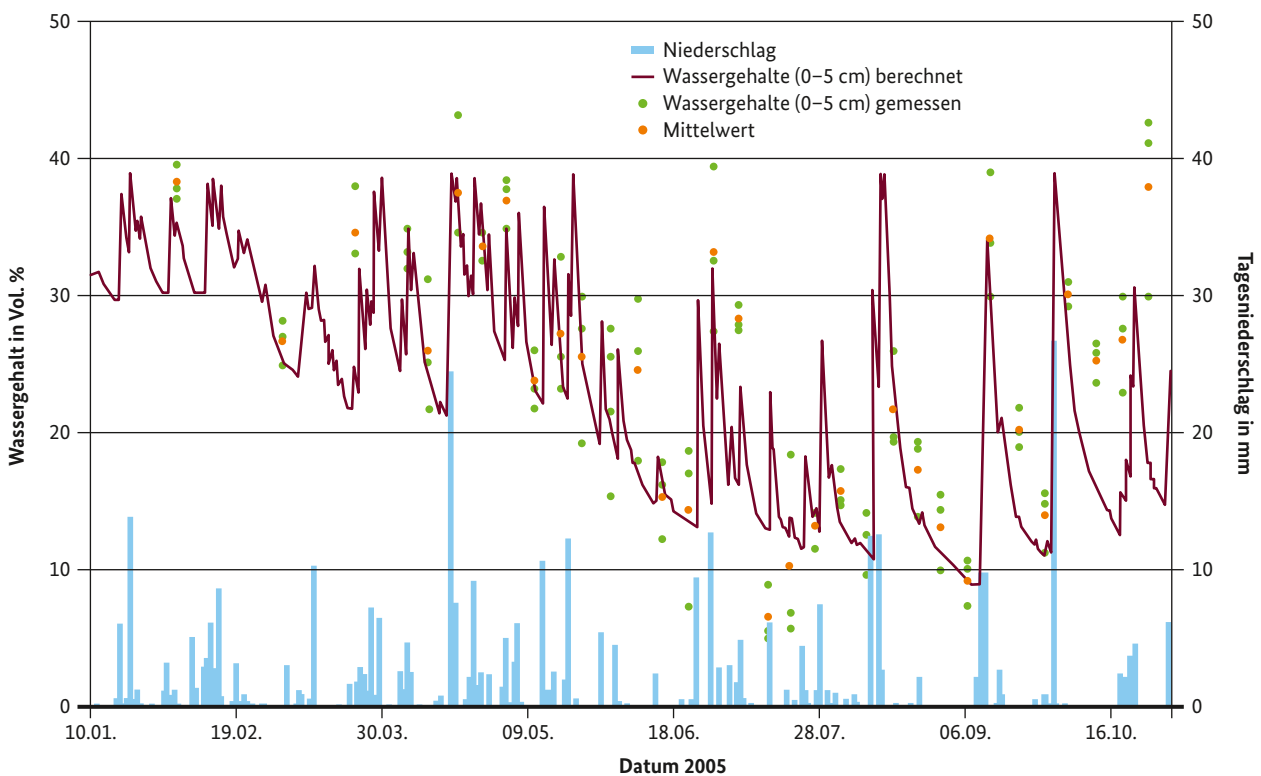
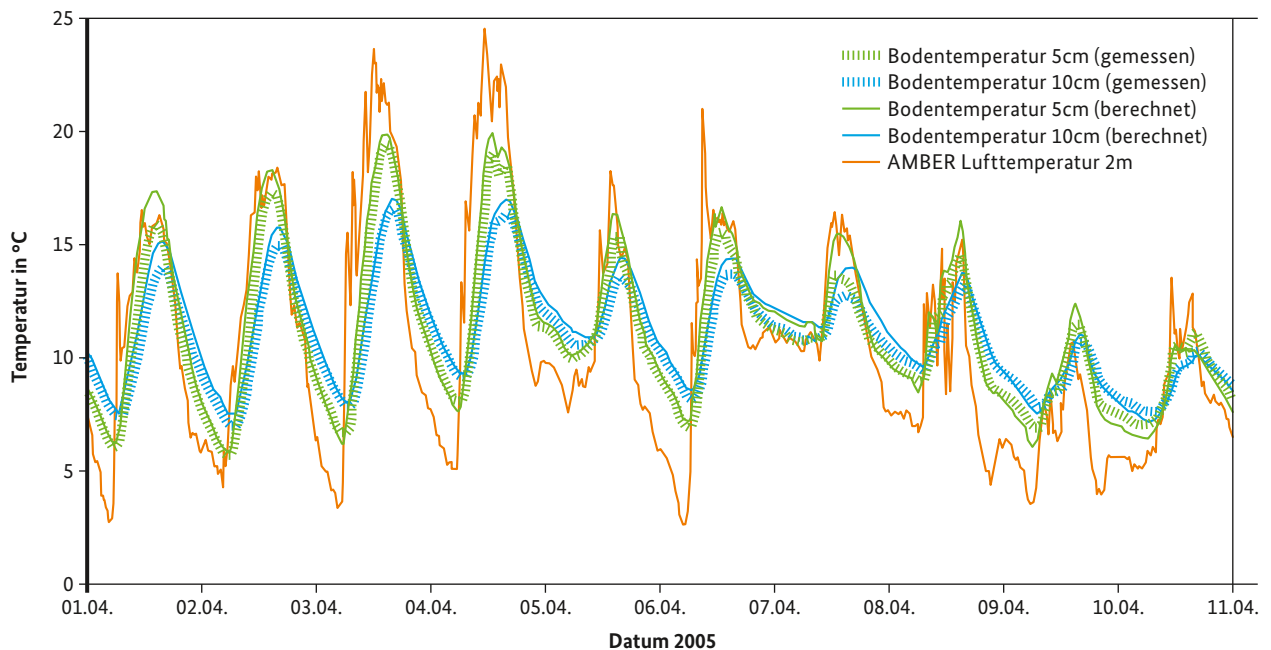


Abb. 6.8.15: Vergleich der berechneten (BEKLIMA) und gemessenen Bodentemperatur in 5 cm und 10 cm Tiefe für den 1.–10. April 2005, Weinbergslage „Mäuerchen“ Geisenheim (Berkelmann-Löhnertz et al., 2005)



Die für die Mitte der Rebasse vom Bestandsklimamodell berechneten Bodentemperaturen gaben die im Jahr 2005 gemessenen Verhältnisse sehr gut wieder. Sowohl für Zeiträume im April ohne nennenswerte Blattentwicklung (Abb. 6.8.15) als auch für Bedingungen mit voller Blattentwicklung (Juli) wurde eine gute Übereinstimmung erzielt.

Die mit Hilfe des Bestandsklimamodells berechneten Parameter Bodenfeuchte und Bodentemperatur des Oberbodens

dienen als Eingangsgrößen zur Modellierung bodenbürtiger Infektionen von *P. viticola*.

#### Abschätzung der Spritzwasserhöhe

Kernstück des erweiterten Krankheitsmodells ist das Splash-Modul. Die Bedeutung von Splash-Ereignissen für die Sporenverfrachtung vom Oberboden in die Laubwand leitet sich aus der Tatsache ab, dass große Regentropfen am Boden mit infektiösen Zoosporen beladen werden und über den Trans-

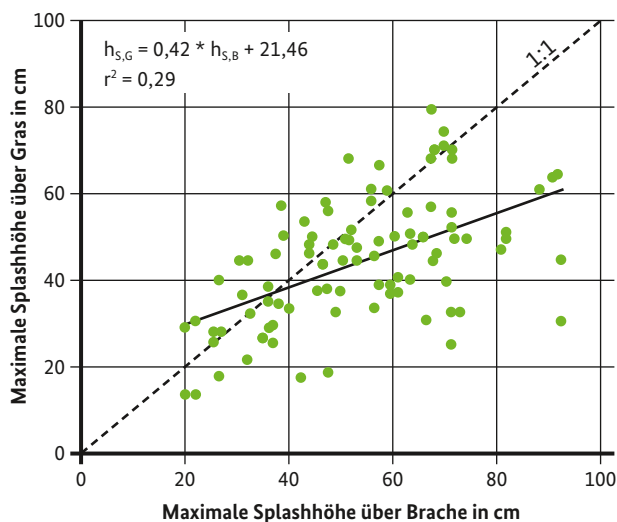


Abb. 6.8.16: links: Filterpapierzylinder (Splash-Meter) und mit Farbpulver markierter Oberboden zur Erfassung der Splash-Dynamik im Weinberg, Foto: C. Frühauf, DWD-ZAMF, rechts: Splash-Spuren auf einem getrocknetem Filterpapier

portweg des Spritzwassers (und der Turbulenz) sowohl in die Laubwand als auch in die Atmosphäre gelangen können. Für *P. viticola* wurden die physikalischen Basisdaten der hierbei stattfindenden Prozesse im Rahmen eines Verbundprojektes erstmals sehr detailliert erarbeitet.

Die Höhe, die Spritzwasser erreichen kann, ist grundsätzlich abhängig vom Regentropfenspektrum (d. h. Landregen < Schauer < Gewitter) sowie von der Beschaffenheit der Aufschlagfläche (z. B. Sandboden, Grasnarbe oder Wasserfilm). So erfolgten die Freilanduntersuchungen zur Splash-Dynamik im Rebbestand innerhalb der Gasse (begrünt, unbegrünt) und zwischen den Rebstöcken. Hierfür wurde das benetzte Filterpapier nach Niederschlagsereignissen entfernt, getrocknet und bezüglich der so genannten Splash-Spuren-Dichte ausgewertet (Abb. 6.8.16). Nach der statistischen Auswertung der beschriebenen Labor- und Freilandversuche wurde ein Submodell zur Abschätzung der Spritzwasserhöhe erstellt.

**Abb. 6.8.17: Vergleich der maximalen Spritzhöhe über Brache ( $h_{s,B}$ ) und Gras ( $h_{s,G}$ ) (Kuczera et al., 2004)**



Über einen längeren Zeitraum wurden die Spritzwasserhöhen für verschiedene Niederschlagsereignisse parallel über Gras und Brache gemessen. Die Spritzwasserhöhen über Gras erreichten im Mittel nicht die über Brache ermittelten Werte (Abb. 6.8.17). Trifft ein Niederschlagstropfen auf der Brache auf, wird die gesamte Energie auf die Spritzwasser-Tröpfchen verteilt. Bei einer begrünten Rebasse hingegen wird ein Teil der Energie vom Gras aufgenommen, da die Grashalme beim Auftreffen der Niederschlagstropfen etwas zurückfedern. Für die Spritzwasser-Tröpfchen steht somit weniger Energie zur Verfügung, so dass nur geringere maximale Spritzhöhen erreicht werden.

#### Bodeninfektionsindex

Um alle Bedingungen zum möglichen Auftreten einer bodenbürtigen Infektion zu berücksichtigen, wurde ein Bodeninfektionsindex (BI) eingeführt. Dieser umfasst Bodenfeuchte-Parameter, die nach Abschluss der Reifung der Oosporen

für deren Keimung von Bedeutung sind. So besteht z. B. ein enger Zusammenhang zwischen dem Flüssigwasserpotential im Oberboden und der Möglichkeit der Bildung kleiner Wasserpfützen, in denen die begeißelten Sporen schwimmen können und dadurch über einen längeren Zeitraum potentiell infektiös bleiben. Von diesen Bedingungen hängt die Auslösung einer erfolgreichen Infektion durch Splash maßgeblich ab.

#### Blattnässe

Vor allem für den Bereich der Sekundärinfektionen ist die Blattnässe von zentraler Bedeutung. Aufgrund der Vielzahl verfügbarer Blattnässesensoren, die unter identischen Feuchtebedingungen voneinander abweichende Messergebnisse ausgeben, wurde entschieden, das Blattnässemodell von Hoppmann und Wittich (1997) (vgl. Kapitel 5.8.3) zu integrieren.

#### Sekundärinfektionen

Je wärmer die Region und je höher die Niederschläge im Mai/Juni, desto schneller und stärker kann sich die Peronospora nach erfolgter Primärinfektion ausbreiten (Hill, 1989b). Die Bedingungen für Infektionen von Blatt zu Blatt wurden bereits Mitte der 70er Jahre intensiv untersucht (Bläser, 1978 und 1979). Voraussetzung sind blattunterseits gebildete Sporangien, die – ähnlich der für den Boden beschriebenen Verhältnisse – mit infektiösen Zoosporen gefüllt sind. Nur beim Vorliegen definierter meteorologischer Bedingungen kommt es zur Bildung eines Sporangienrasens auf der Blattunterseite oder an den Gescheinen, die als Sporulation bezeichnet wird. Folgende Bedingungen müssen erfüllt sein:

- sichtbare Ölflecken
- Dunkelheit
- durchgehende Blattnässe von mindestens vier Stunden oder eine relative Feuchte > 97%
- Temperatur > 12,5°C zu Beginn der Feuchtephase
- Durchschnittstemperatur > 11°C während der ersten vier Stunden der Nässe-Dunkelperiode

Nur wenn alle Punkte erfüllt sind, bildet sich der Sporangienrasen (Abb. 6.8.18). Hier wird deutlich, warum die genaue Modellierung der Blattnässedauer von so entscheidender Bedeutung ist. Bei einer Dauer knapp unter vier Stunden tritt keine Sporulation auf. Wird die Grenze von vier Stunden überschritten, findet Sporulation statt und der Sporangienrasen ist auf der Blattunterseite zu erkennen. Je höher die Temperatur in den ersten vier Stunden mit Blattnässe ist, desto mehr Sporangien werden gebildet (Hill, 1989a).

Zu einer Infektion benachbarter Blätter kommt es jedoch nur, wenn auch in der nachfolgenden Zeitspanne bestimmte Bedingungen erfüllt sind. Weiter anhaltende Blattnässe von mindestens fünf Stunden und gleichzeitig eine Temperatursumme von 50 Gradstunden sind zusammen mit tropfbar flüssigem Wasser Voraussetzung für die Verfrachtung der Sporangien auf andere Blätter. Bei weiter anhaltender Blattnässe (2-4 Stunden) werden aus den Sporangien auch bei vollem Tageslicht reife Zoosporen entlassen, so dass Neuinfektionen stattfinden können. Bei nicht optimalen





Abb. 6.8.18: Sporulation von *Plasmopara viticola*. links: Sporulation auf der Blattunterseite (weißer Rand um Nekrose), rechts: Sporangienrasen an einem jungen Geschein, Fotos: Hochschule Geisenheim University

Bedingungen können die Sporangien mehrere Stunden bis Tage in Abhängigkeit von der herrschenden Temperatur und relativen Feuchte überleben. Die entlassenen Zoosporen dagegen haben nur eine kurze Lebensdauer. Wenn nicht innerhalb weniger Stunden eine Infektion gesetzt werden kann (Abwerfen der Geißeln; Bildung einer Keimhyph), stellen die empfindlichen Zoosporen ihre Schwimmbewegung ein und sterben ab. Das Ende der Inkubationszeit zeigt sich am Auftreten eines Ölflecks, der typischen Läsion nach einer Peronospora-Infektion. Die Inkubationszeit ist ebenfalls temperaturabhängig und liegt bei (hoch)sommerlichen Bedingungen zwischen einer und zwei Wochen.

Im Gegensatz zu bodenbürtigen Infektionen breiten sich Sekundärinfektionen relativ kleinräumig aus, da weder Sporangien noch entlassene Zoosporen vom Blatt oder Geschein über größere Distanzen verfrachtet werden können. Großflächige (Erst-)Infektionen ganzer Weinberge gehen demzufolge in aller Regel vom Boden aus – ein Indiz für die Gefährlichkeit oder „Virulenz“ bodenbürtiger Infektionen.

#### Implementierung in die agrarmeteorologische Beratungssoftware

Alle neuen Submodelle und Indizes wurden für die Nutzung in der Beratungsroutine in das Softwarepaket (AMBER) des DWD aufgenommen (Abb. 6.8.19). Der Sekundärzyklus des Pilzes und die Phänologie der Rebe finden ebenfalls Berücksichtigung (Adaption des Blattflächenmodells nach Schultz, 1992). Als Input-Parameter fließen die meteorologischen Daten des Weinbaumessnetzes im Rheingau sowie die meteorologischen Daten der numerischen Wettervorhersage ein. Unter Einbeziehung aller genannten Modelle, Submodelle und Indizes werden folgende Ausgabeparameter berechnet:

- Tage mit boden- und blattbürtigen Infektionen durch *P. viticola*
- Länge der jeweiligen Inkubationszeit (in Tagen)

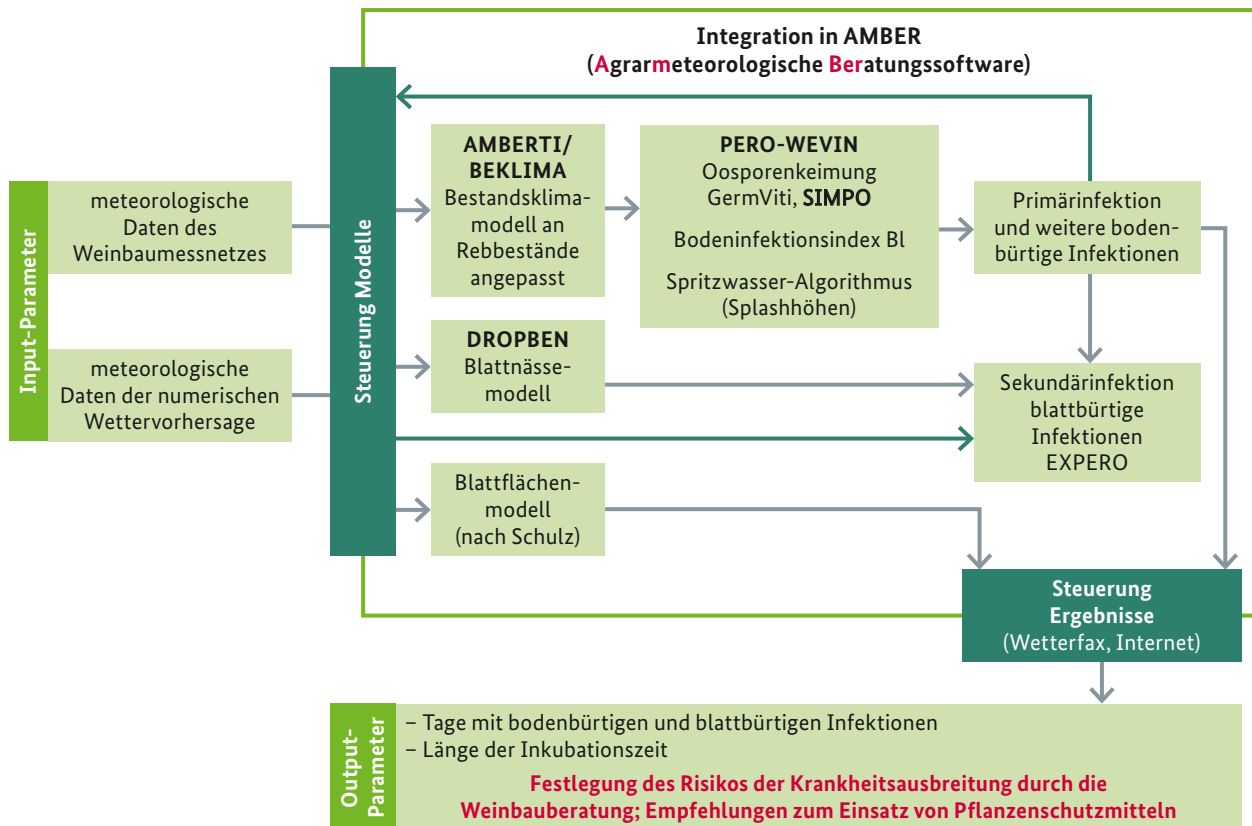
Mit dem Primärinfektionsmodell wurde ein redundantes System zur Wahrscheinlichkeit des Auftretens bodenbürtiger Infektionen durch *P. viticola* und damit zum Infektionsrisiko geschaffen. Im Rahmen der Validierung konnte gezeigt werden, dass das neue, komplexe Krankheitsmodell eine hohe Prognosesicherheit bietet. Das bedeutet, dass sowohl der Anteil „falsch negativer“ Ergebnisse – mit möglicherweise fatalen Folgen in der Anbaupraxis – als auch Meldungen mit „falsch positiven“ Modellergebnissen verschwindend gering sind.

Auf der Basis des neuen Modells ist ein besseres Verständnis der biologischen Prozesse beim Durchlaufen der Infektionszyklen von *P. viticola* möglich geworden (Oosporen-Reifung, Oosporen-Keimung, Primärinfektion, Inkubation, Sporulation, Sekundärinfektionen, ggf. weitere bodenbürtige Infektionen). Nur mit diesem Wissen können Fungizid-Behandlungen an den individuell herrschenden Befallsdruck angepasst werden. Die Peronospora-Kalamität im Jahr 2016 hat gezeigt, wie hilfreich insbesondere die exakte Vorhersage der zahlreichen bodenbürtigen Infektionen und auch die Darstellung der starken Überlappung von Inkubationszeiten als Entscheidungshilfe in der Rebschutzpraxis war. Um trotz des hohen Befallsdrucks qualitativ hochwertiges Lesegut erzeugen zu können, erforderte die Vegetationsperiode 2016 einen engmaschigen Pflanzenschutz ohne Einsparpotential. Vom neuen Krankheitsmodell wurde dieser eklatante Infektionsdruck äußerst realitätsgetreu prognostiziert.

#### 6.8.4.2 Echter Mehltau

Der Erreger des Echten Mehltaus, *Erysiphe necator* (Ascomycetes; Hauptfruchtform), verursacht ebenfalls erhebliche Ertragsverluste und mindert insbesondere die Weinqualität (Kast, 2005). In der Weinbaupraxis wird gerne der Begriff

Abb. 6.8.19: Struktur des Geisenheimer Peronospora-Modells und Art der Implementierung in der Agrarmeteorologische Beratungssoftware AMBER



„Oidium“ zur Bezeichnung der Krankheit verwendet, der sich von der Nebenfruchtform des Ascomyceten, *Oidium tuckeri*, ableitet. Befallene Beeren (Abb. 6.8.20) können zu einer starken Beeinträchtigung des Weines hinsichtlich Geruch und Geschmack führen. Die verschiedenen Rebsorten unterscheiden sich in ihrer Anfälligkeit gegenüber dem Echten Mehltau. Die Beeren selbst können nach der Blüte (BBCH 61) meist nur bis zum Stadium „schrotkorngroße Beeren“ (BBCH 73) befallen werden (Stark-Urnau und Kast, 1999).

Zur Terminierung der Behandlungen wurde von Kast (1997) eine Risiko-Analyse entwickelt, die auf der Bonitur des letztjährigen Befalls gemäß der Boniturstadien in Tabelle 6.8.1 aufbaut und den Termin der ersten Pflanzenschutzapplikation nach Auftreten des 3-Blattstadiums festlegt. Als Faustformel gilt:

- Boniturwert von 0 bis 3: spätestens zwischen dem 6- und 9-Blattstadium (bzw. mit der ersten Behandlung gegen die Reben-Peronospora)
- Boniturwert 4 und 5: zwischen dem 3- und 6-Blattstadium



**Tab. 6.8.1: Definitionen für die Boniturwerte 1 bis 5 zur Charakterisierung der Befallsintensität des Echten Mehltaus (*Erysiphe necator*) im Vorjahr**

Boniturwert	Befallsstärke
0	keinerlei Befall mit Oidium
1	geringer Spätbefall an einzelnen Blättern und Trieben
2	in einzelnen Anlagen Spätbefall gefunden
3	verbreiteter Spätbefall an Blättern und Geiztrauben
4	starker Befall: früher Blattfall, Zeigertriebe, Schäden an Trauben
5	in mehr als 5% der Anlage Traubenbefall gefunden

Die nachfolgenden Spritzintervalle sind abhängig von der Temperatur, der relativen Feuchte, der Blattnässe und dem Niederschlag. Anhand der genannten Parameter wird für jeden Tag das Risiko für eine Infektion berechnet. Auf dieser Basis erfolgt eine Differenzierung zwischen den Zuständen „keine Gefahr“ (0-33%), „mittleres Oidium-Risiko“ (34-66%) und „hohes Oidium-Risiko“ (67-100%) (Bleyer et al., 2013).

#### Schwarzfäule

Der Erreger der Schwarzfäule *Guignardia bidwellii* (Hauptfruchtform) führt seit Beginn des 21. Jahrhunderts verstärkt zu Schäden in europäischen Weinbauregionen (Molitor, 2008, Molitor et al., 2014). Typische Blattsymptome sind

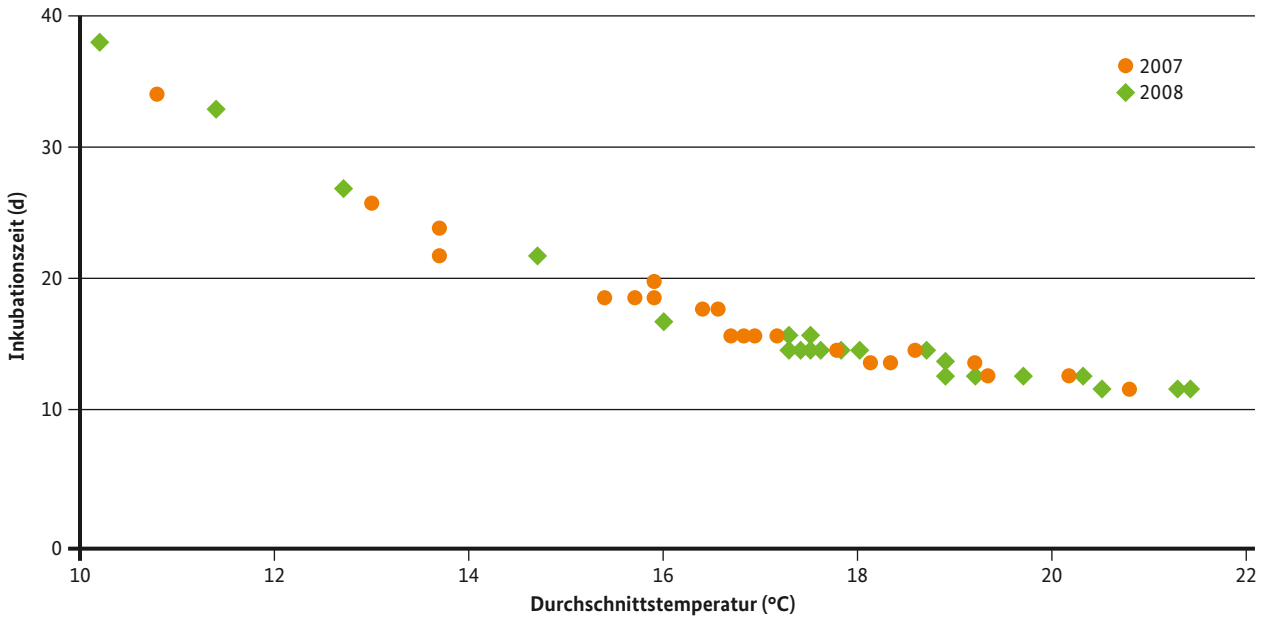
Nekrosen mit ringförmig angeordneten Konidien-Fruchtkörpern. Befallene Beeren können im Extremfall zu Mumien eintrocknen (Abb. 6.8.21). Hohe Niederschlagsmengen im Frühjahr und Sommer begünstigen die Entwicklung der Schwarzfäule. Besonders stark kann sie sich ausbreiten, wenn nicht ordnungsgemäß bewirtschaftete Weinberge (sogenannte „Drieschen“) vorliegen. Aufgrund der Tatsache, dass in solchen Parzellen gar kein oder kein ausreichender Pflanzenschutz erfolgt, erhöht sich der Infektionsdruck auf die umliegenden Weinberge. Neben dem Ertrag wird auch die Weinqualität beeinflusst. Mittlerweile stehen mehrere Fungizide mit Wirksubstanzen aus unterschiedlichen Wirkstoffgruppen zur Bekämpfung der Schwarzfäule zur Verfügung. Diese umfassen sowohl Mittel mit protektiver als auch mit kurativer Wirkung.

Die Länge der Inkubationszeit ist temperaturabhängig und liegt im Bekämpfungszeitraum (Mitte Mai bis Anfang August) meist zwischen 12 und 18 Tagen (Abb. 6.8.22). Inkubationszeiten von über 20 Tagen treten nur im zeitigen Frühjahr und im Herbst bei Tagesmitteltemperaturen unter 15 °C auf. Ausgehend von den Untersuchungen zur Infektionsbiologie des Pilzes wurde eine Temperatursumme (untere Grenze: 6 °C, obere Grenze: 24 °C) entwickelt. Die Symptome treten bei einer Temperatursumme von etwa 175 Gradtagen auf. Durch die Nutzung von Vorhersagedaten kann der Termin, an dem 85 % der Inkubationszeit abgelaufen sind, gut abgeschätzt werden. Das Modell ist ein wichtiges Instrument zur besseren Terminierung kurativ wirkender Pflanzenschutzmittel (Molitor et al., 2011).



Abb. 6.8.21: Symptome der Schwarzfäule, oben: an Blättern, unten: an Trauben bzw. Beeren, Fotos: Hochschule Geisenheim University

Abb. 5.8.22: Abhängigkeit der Inkubationszeitlänge von *Guignardia bidwellii* an Topfreenblättern unter Freilandbedingungen von der Durchschnittstemperatur, 2007 und 2008, Rebsorte: Müller-Thurgau (Molitor et al., 2012)

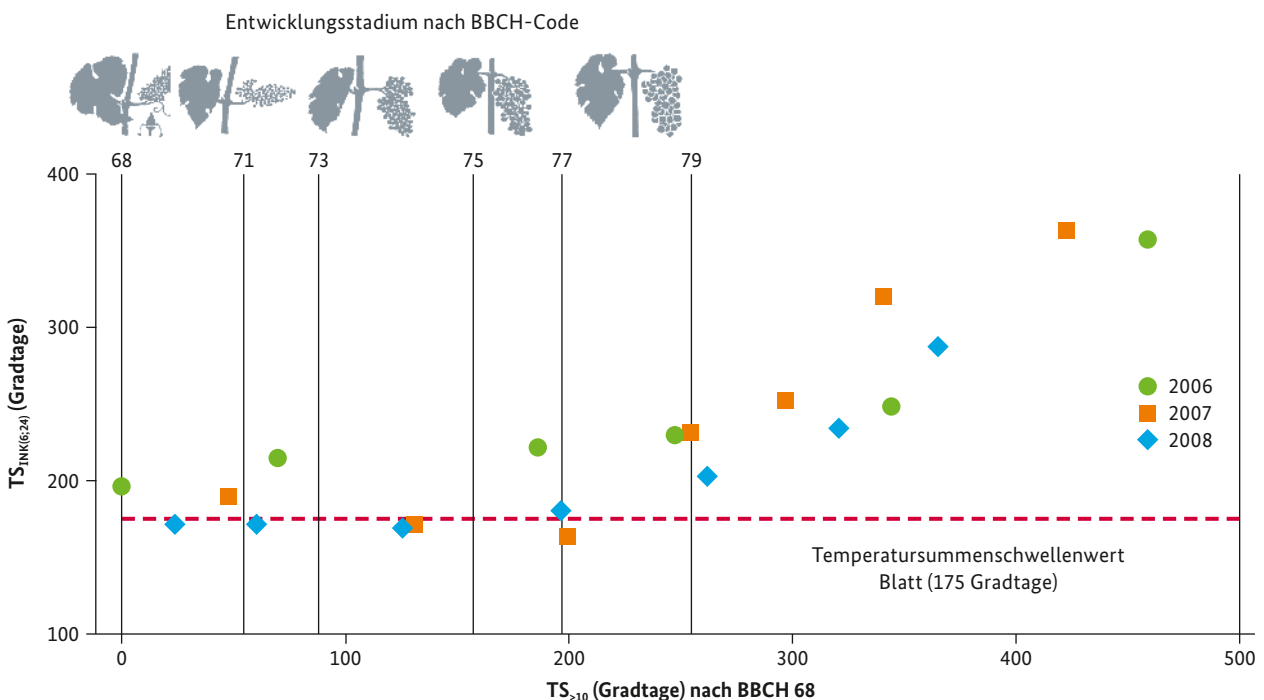


Untersuchungen im Weinberg an Trauben zeigten zusätzlich eine Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium der Beeren. Bis zum Erreichen des Stadiums „Beginn Traubenschluss“ (BBCH 77) ist die Länge der Inkubationszeit an Beeren und Blättern gleich. Nachfolgend verlängert sich die Inkubationszeit mit fortschreitender Beerenentwicklung kontinuierlich (Abb. 6.8.23). Mithilfe eines von der Beerenentwicklung abhängi-

gen Korrekturfaktors erfolgte die Anpassung der für Blätter entwickelten Temperatursumme.

Die relativ lange Inkubationszeit von *Guignardia bidwellii* begrenzt die mögliche Anzahl an Infektionszyklen pro Vegetationsperiode. Die Schwarzfäule kann sich somit nicht so schnell ausbreiten, wie z. B. der Falsche Mehltau.

Abb. 6.8.23: Temperatursummen  $T_{INK(6;24)}$  bis zum Erscheinen erster Symptome an Beeren im Freiland in Abhängigkeit von der Summe der Tagesmitteltemperaturen über 10 °C seit dem Jahrestag nach Erreichen von BBCH 68 (80 % der Blütenköpchen abgeworfen) ( $T_{>10}$ ) bis zum Zeitpunkt der Inokulation in den Versuchsjahren 2006 bis 2008. Rebsorte: Riesling (Molitor et al., 2012)



### 6.8.5 Tierische Schaderreger im Weinbau

Zur Bestimmung des Auftretens tierischer Schaderreger im Weinbau spielen Temperatursummenmodelle eine wichtige Rolle. Die Ermittlung des Flugbeginns der beiden Traubenwicklerarten Bekreuzter Traubenwickler (*Lobesia botrana*, Abb. 6.8.24 oben) und Einbindiger Traubenwickler (*Eupoecilia ambiguella*, Abb. 6.8.24 unten) ist eine wichtige praktische Anwendung, da auf dieser Basis das Aufhängen der Pheromon-Dispenser besser geplant werden kann. Die Bekämpfung erfolgt durch die „Verwirr-Methode“. Durch



Abb. 6.8.24: Traubenwicklerarten, oben: Bekreuzter Traubenwickler (*Lobesia botrana*), unten: Einbindiger Traubenwickler (*Eupoecilia ambiguella*), Fotos: Hochschule Geisenheim University



Abb. 6.8.25: Glasflügelzikade (*Hyalesthes obsoletus*), Foto: Hochschule Geisenheim University

das flächenhafte Ausbringen des weiblichen Pheromons in den Weinbergen wird der Kontakt zwischen Männchen und Weibchen verhindert bzw. stark erschwert, so dass Begattungen unterbleiben.

Der Überträger der Schwarzholzkrankheit ist die Glasflügelzikade (*Hyalesthes obsoletus*, Abb. 6.8.25). Zu den Wirtspflanzen gehören Brennnessel und Ackerwinde, wobei nur die erwachsenen, geflügelten Tiere oberirdisch leben. Sie saugen im bodennahen Bereich an den Sprossen der Brennnessel (Kast et al., 2016). Erfolgt die Bekämpfung von Brennnessel und Ackerwinde innerhalb der Periode, in der die flugfähigen Insekten unterwegs sind, suchen sich die Tiere andere Wirtspflanzen. Durch Probestiche an Reben wird die Krankheit übertragen, wobei der Brennnessel-Typ gefährlicher ist als der Ackerwinden-Typ. Der Flugbeginn der Glasflügelzikade kann über eine Temperatursumme berechnet werden. Ist das Datum erreicht, sollte die Bekämpfung der Wirtspflanzen unterbleiben, um die Übertragung des Erregers zu verhindern.

Für die gezielte Bekämpfung von Kräuselmilben (*Calepitrimerus vitis*) und Blattgallmilben (*Colomerus vitis*; wegen des Schadensymptoms auch Pockenmilbe genannt) steht über die Nutzung von Temperatursummen ebenfalls eine



Abb. 6.8.26: Blatt-Symptome durch den Befall von Kräuselmilben (oben) und Blattgallmilben (unten), Fotos: Hochschule Geisenheim University

wertvolle Entscheidungshilfe zur Verfügung. Beide Milbenarten stechen bereits junge Blätter an und beginnen sie auszusaugen. Der Befall der Kräuselmilbe führt zu kümmerlichem Wuchs und Verzweigungen (Abb. 6.8.26 oben), wobei die Triebe oftmals vertrocknen und abfallen. Im Falle der Blattgallmilbe reagieren die Blätter im Bereich der Einstichstelle mit der Bildung eines starken Haarfilzes auf der Blattunterseite, der blattoberseits an eine Pocke erinnert (Abb. 6.8.26 unten). Früher Befall bereits im Wolle Stadium führt zu einem verkümmerten und verzögerten Austrieb (Ökolandbau, 2016).

## 6.8.6 Weinbauliche Beratung

### 6.8.6.1 Rheingau

Im Rheingau erfolgt die Rebschutzberatung derzeit unter Beteiligung dreier Institutionen mit folgenden Tätigkeitsschwerpunkten:

- Deutscher Wetterdienst (Zentrale in Offenbach)  
→ Wettervorhersage,
- Hochschule Geisenheim University (Institut Phytomedizin)  
→ Berechnungen mit Hilfe agrarmeteorologischer Modelle und

- Dezernat Weinbau des Regierungspräsidiums Darmstadt (Eltville) → praktische Rebschutzhinweise.

Sowohl die Zusammenstellung also auch die Endredaktion des „Weinbau-Wetterfax“ wird derzeit in Eltville durchgeführt. Der Versand an die Abonnenten erfolgt heutzutage entgegen der immer noch bestehenden Bezeichnung per E-Mail. Parallel zum Weinbau-Wetterfax besteht die Möglichkeit, das gerade abgelaufene Infektionsgeschehen und den Prognosebereich auf den Rebschutz-Seiten der Hochschule Geisenheim University zu verfolgen (Berkelmann-Löhnertz et al. 2016a,b; <http://www.hs-geisenheim.de/forschungszentren/institut-fuer-phytomedizin/rebschutz.html>).

Hier werden die berechneten Modellergebnisse aller 13 Funkwetterstationen des Rheingaus im übersichtlichen Grafik-Format präsentiert (Abb. 6.8.27). Parallel werden im Verlauf der Vegetationsperiode Balken-Grafiken generiert, in denen alle Einzelzyklen der abgelaufenen bodenbürtigen Infektionen sowie der Sekundärinfektionen chronologisch angeordnet sind (Abb. 6.8.28). Bei Bedarf kann auf die Darstellung in Tabellenform zurückgegriffen werden. Zusammenfassend werden (während der Vegetationsperiode) aktuelle Informationen zu folgenden Bereichen zur Verfügung gestellt:

- Witterungsverlauf,
- Rebentwicklung nach Schultz (1992),

Abb. 6.8.27: Tagessummen des Niederschlags und Modellierungsergebnisse des Geisenheimer Peronospora-Prognosemodells: Abschluss der Winterruhe der Oosporen (grau hinterlegter Bereich), Höhe des Spritzwassers (rote Punkte), Verlauf des Bodeninfektionsindex (grüner Kurvenverlauf) sowie der Bodenfeuchte (blauer Kurvenverlauf), Standort Lorch 2016

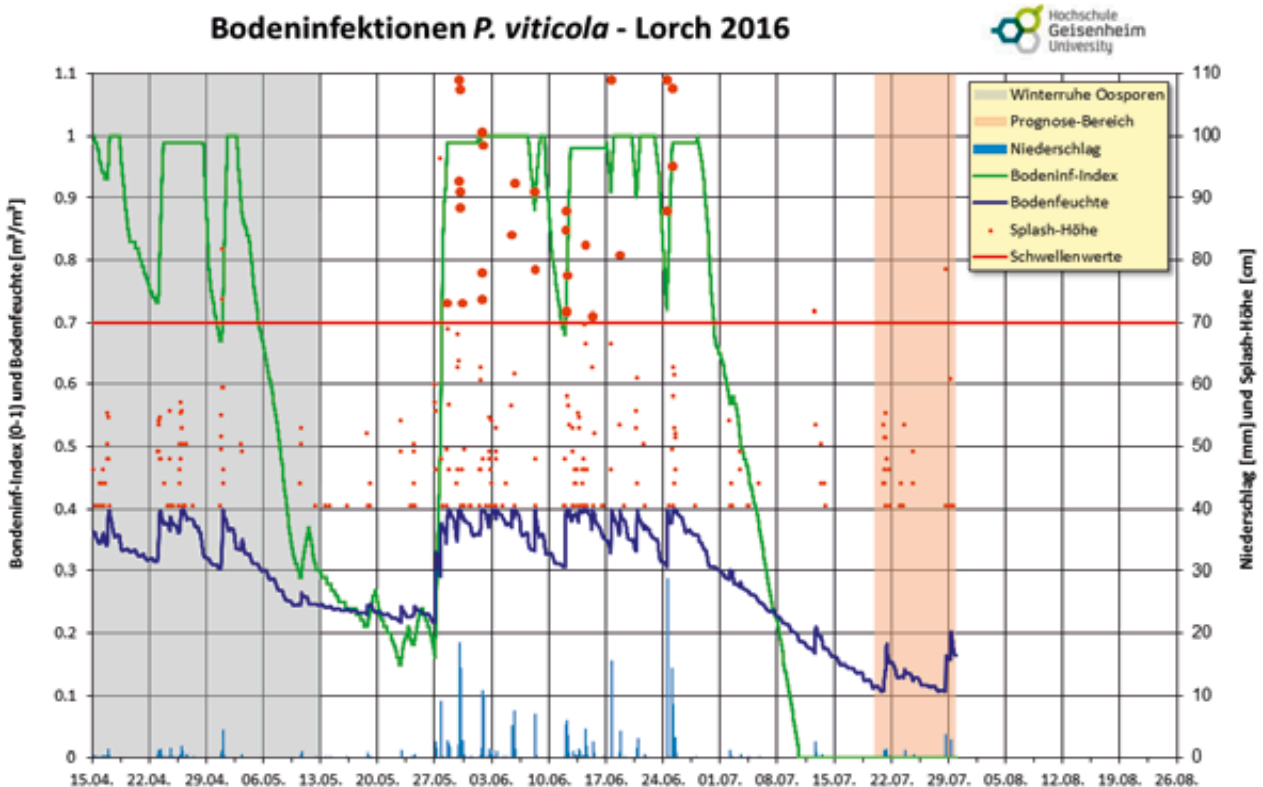
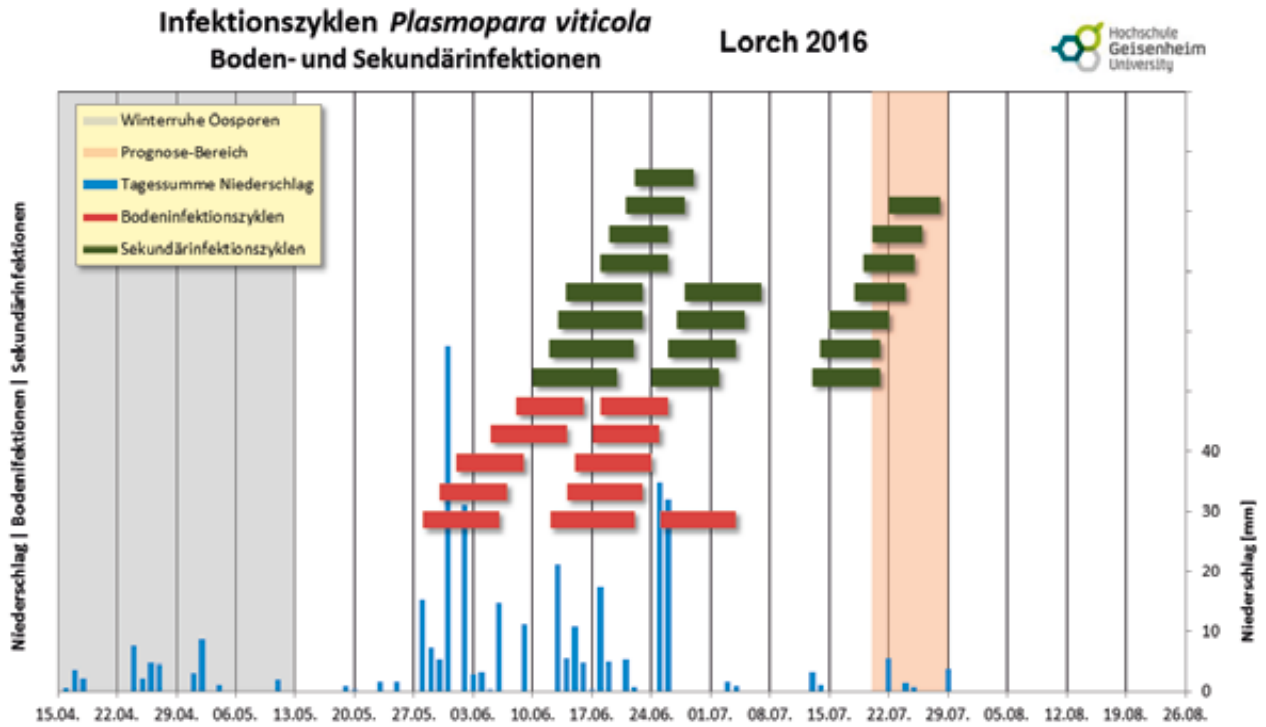


Abb. 6.8.28: Tagessummen des Niederschlags und Inkubationszeitlängen für bodenbürtige (braun) und blattbürtige (grün) Infektionen, Standort Lorch 2016

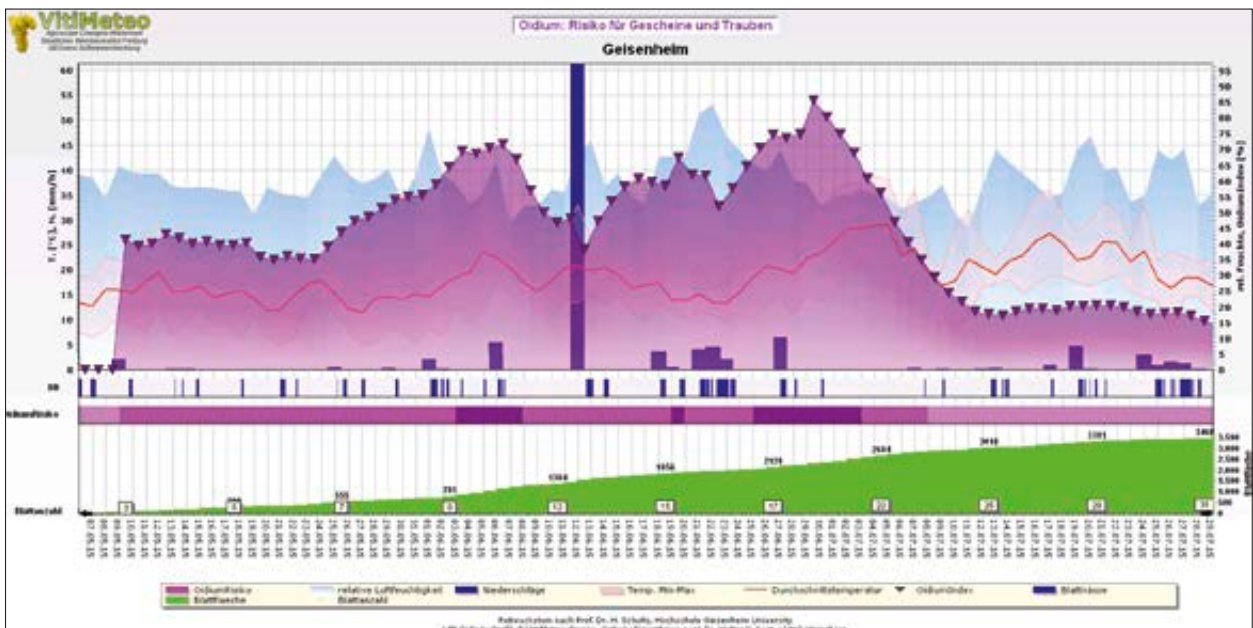


- Rebenperonospora-Prognose (*Plasmopara viticola*) nach Berkelmann-Löhnertz et al. (2005) und Hill (1989a,b),
- Oidium-Prognose (*Erysiphe necator*) nach Kast (1997),
- Monitoring Kirschessigfliege (*Drosophila suzukii*),
- Rebzikaden,
- Traubenwickler (Terminierung Aushängen der RAK-Dispenser) und
- Links zu drei Wettervorhersagediensten.

Das Ziel ist es, den Rheingauer Winzern eine qualitativ hochwertige und vielfältige Beratung als Entscheidungshilfe beim Rebschutz über den Weg der E-Mail zur Verfügung zu stellen.

Im Falle der Berechnungen zum Auftreten des Falschen Mehltaus liegt der Fokus auf der Vorhersagegüte, d. h. die Prognosegenauigkeit ist von entscheidender Bedeutung. Nur so kann das Vertrauen zur Winzerschaft aufgebaut

Abb. 6.8.29: Screenshot von VitiMeteo Oidium (*Erysiphe necator*) auf der Basis von Geisenheimer Wetterdaten (Standort: Kellersgrube)



und nachhaltig gefestigt werden. Wie das Feedback aus der Rebschutzpraxis zeigt, ist diese spezielle Form des Wissenstransfers von großem Nutzen für die jeweils anstehenden Entscheidungen im Rebschutz.

Die Berechnungen für den Echten Mehltau erfolgen mit einem Risikomodel, das auf Oidiag 3.0 nach Kast (1997, 2005, 2010) basiert. Die im Internet präsentierte Oidium-Prognose wird in der VitiMeteo-Plattform für den Versuchsstandort „Kellersgrube“ in Geisenheim berechnet (Abb. 6.8.29). Partiiell sind diese Ergebnisse auf andere Regionen des Rheingaus übertragbar. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Epidemie bei frühen Sorten bzw. Sorten mit hoher Oidium-Anfälligkeit schon weiter fortgeschritten sein kann und dass diese möglicherweise für benachbarte Anlagen eine Inokulum-Quelle (Verfrachtung über Wind) darstellen können.

#### Implementierung agrarmeteorologischer Modelle in der Lehre

Den Lehrenden der Hochschule Geisenheim ist es ein großes Anliegen, agrarmeteorologische Modelle in der Lehre zu implementieren. So erhalten die Studierenden des Studiengangs „Weinbau und Oenologie“ im Rahmen der Vorlesung „Rebschutz“ einen vertieften Einblick in die Struktur verschiedener Krankheits- und Schädlingsmodelle. Darüber

hinaus werden die vielfältigen Möglichkeiten der Nutzung agrarmeteorologischer Modelle zur Optimierung des praktischen Rebschutzes anhand von Beispielen aufgezeigt. Das wesentliche Ziel des Moduls „Agrarmeteorologische Modelle im Rebschutz“ ist die Befähigung zur Nutzung der gesamten Bandbreite der zur Verfügung stehenden weinbaulichen Entscheidungshilfen, damit auch komplexe Internet- und andere Beratungsangebote von den Absolventen interpretiert und professionell genutzt werden können.

#### 6.8.6.2 Baden-Württemberg

Über die Plattform „VitiMeteo“ ([www.vitimeteo.de](http://www.vitimeteo.de)) werden Prognosemodelle, Monitoring- und Wetterdaten für den Weinbau Beratern und Praktikern zur Verfügung gestellt. Seit dem Jahr 2002 wurde die Internetplattform gemeinsam und kontinuierlich vom Staatlichen Weinbauinstitut Freiburg, den Forschungsanstalten Agroscope Changins-Wädenswil, der Firma GEOsens in Kooperation mit Wissenschaftlern/innen anderer Institute weiterentwickelt (Bleyer et al., 2014). Derzeit liegen die in Tabelle 6.8.2 aufgeführten Modelle für wirtschaftlich wichtigsten Rebkrankheiten und Schädlinge vor. Etwa 50 ausgewählte Wetterstationen des agrarmeteorologischen Messnetzes werden für die Berech-

Tab. 6.8.2: Überblick über die Angebote der Plattform „Vitimeteo“, 2003-2017

	Kurzbeschreibung / Herkunft	Internet
<b>Modelle</b>		
VM Rebenperonospora	Prognosemodell: Rebenperonospora (Falscher Mehltau der Weinrebe) (Müller und Sleumer, 1934; Hill, 1989a,b; Bleyer et al., 2008; Dubuis et al., 2012)	seit 2003
VM Oidium	Risikomodel: Oidium (Echter Mehltau der Weinrebe) (Kast, 1997, 2010)	seit 2009
VM Schwarzfäule	Prognosemodell: Schwarzfäule der Weinrebe (Molitor et al., 2012, 2014)	seit 2013
VM Wachstum	Wachstumsmodelle für die Rebsorten Riesling, Blauer Spätburgunder und Müller-Thurgau (Schultz, 1992)	seit 2004
VM Traubenwickler	Temperatursummenmodell: Flugbeginn Traubenwickler (Vogt und Schruft, 2000)	seit 2007
VM Schwarzholz	Temperatursummenmodell: Flugbeginn Glasflügelzikade (Maixner und Langer, 2006)	seit 2011
VM Kräusel- und Pockenmilbe	Temperatursummenmodell: Wanderungsbeginn Kräusel- und Pockenmilbe (Duffner, 1999; Wegner-Kiß, 2003)	seit 2014
VM Wettergrafik	Interaktives Werkzeug zur Erstellung von Wettergrafiken	seit 2017
<b>Wetterdaten</b>		
VM Wetterdaten	Grafiken: Gemessene und vorhergesagte Wetterdaten	seit 2006
VM Meteogramme	Detaillierte Wettervorhersage für sieben Tage	seit 2010
VM Stationsübersicht	Grafik: Standorte der Wetterstationen und deren Daten	seit 2013
<b>Monitoring</b>		
VM Monitoring	Online-Meldungen der Rebschutzwarte und Forschungseinrichtungen; Darstellung der tatsächlichen Befallssituation für Krankheiten und Schädlinge (Bleyer et al., 2015)	seit 2015
<b>weiterer Service</b>		
VM Widget	Programm: Darstellung der aktuellen VitiMeteo-Infos auf dem Desktop	seit 2011
VM Mobil	Mobilversion für VitiMeteo-Infos	seit 2014
VM Phänologie	Simulation der phänologischen Stadien der Rebentwicklung (BBCH-Station) / Molitor et al. (2014), Bleyer et al. (2016)	seit 2016



Abb. 6.8.30: Rebenperonospora – Risikografik: infektionsrelevante Daten in zusammengefasster Form als Tageswerte; oben: Wetterdaten, Mitte: Peronospora-Risiko, unten: Rebwachstum; grau hinterlegter Bereich: siebentägige Prognose.

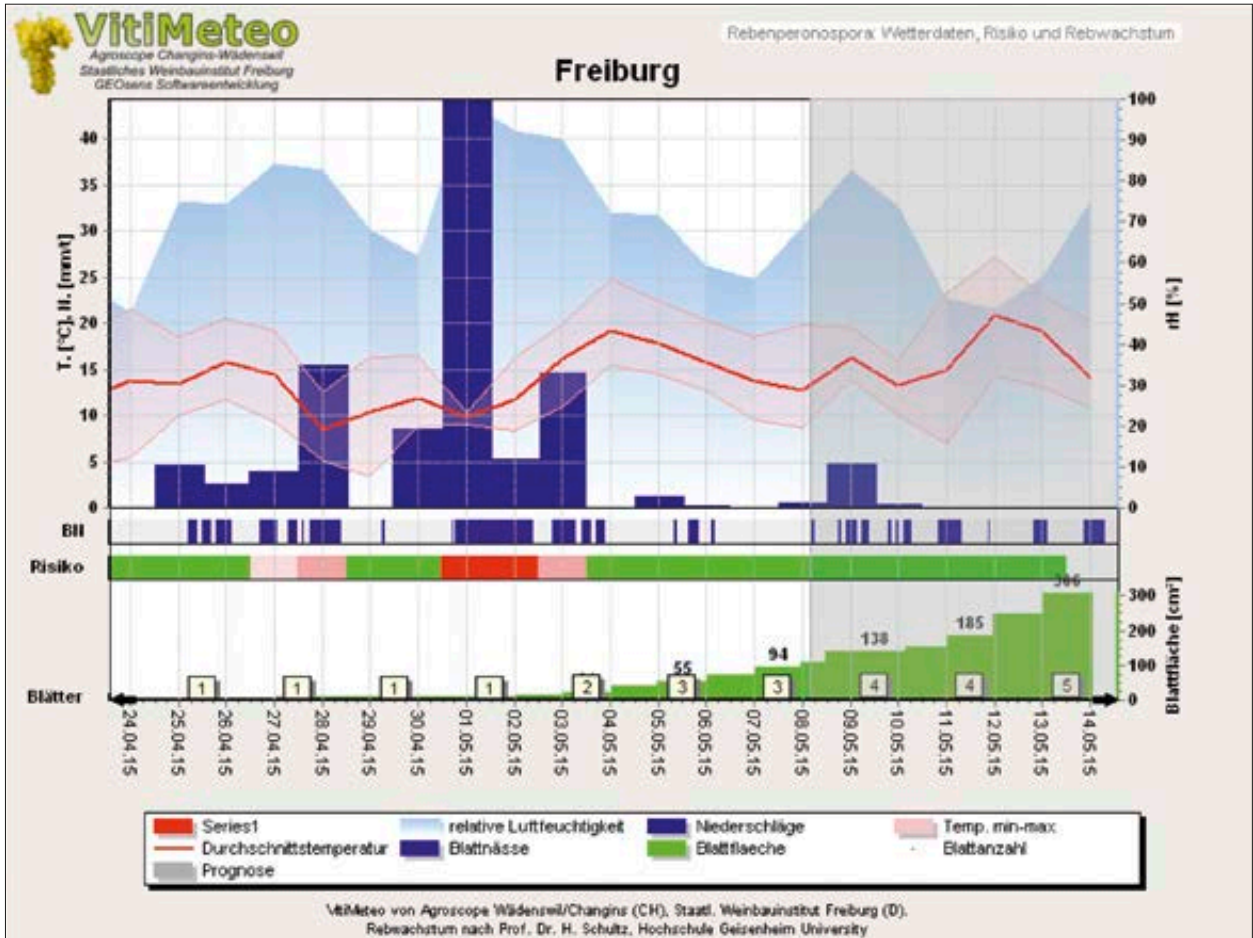


Abb. 6.8.31: Oidium – Risikotabelle

Station: Freiburg, 01.01.2015 - 31.12.2015  
 Erstellt: 25.12.2015 07:16:51    Wetterdaten bis 25.12.2015 05:50    Vorhersage bis: 31.12.2015 13:00

Austrieb: 24.04.2015 00:00    Wachstum angegeben für Durchschnittsrebsorte pro Haupttrieb (ohne Geiztriebe)

Datum	Oidium-Index	Risiko	Temperatur °C			Nieder-schlag mm	Wachstum		Bemerkungen
			Min	Ø	Max		Blatt-zahl	Blatt-fläche cm²	
06.06.2015	85 %	!!!	16,7	23,7	30,6	19,9	13	1695	
07.06.2015	86 %	!!!	17,1	21,9	26,7	1,6	13	1786	
08.06.2015	73 %	!!!	13,3	15,6	17,8	0,0	13	1824	
09.06.2015	78 %	!!!	12,2	15,3	17,9	0,0	14	1858	
10.06.2015	83 %	!!!	13,8	17,3	20,6	0,0	14	1919	
11.06.2015	84 %	!!!	13,0	20,1	27,6	0,0	14	1986	
12.06.2015	88 %	!!!	15,0	20,0	28,1	21,9	15	2062	
13.06.2015	89 %	!!!	15,4	20,3	25,0	0,0	15	2130	
14.06.2015	92 %	!!!	15,6	19,6	24,4	22,6	16	2190	
15.06.2015	92 %	!!!	15,2	17,1	19,8	16,4	16	2236	

nungen genutzt. Zusätzliche Expertenprogramme erlauben Rechenläufe für Testzwecke, mit denen eine Verbesserung der biologischen Modelle möglich ist.

Eine entscheidende Rolle für die Arbeitsplanung im modernen Weinbaubetrieb spielt die Wetterprognose. Neben den Grafiken mit der Darstellung von gemessenen und vorhergesagten Wetterdaten zeigen die Meteogramme detaillierte Wetterprognosen der Firma „meteoblue“ (Basel) für die nächsten sieben Tage.

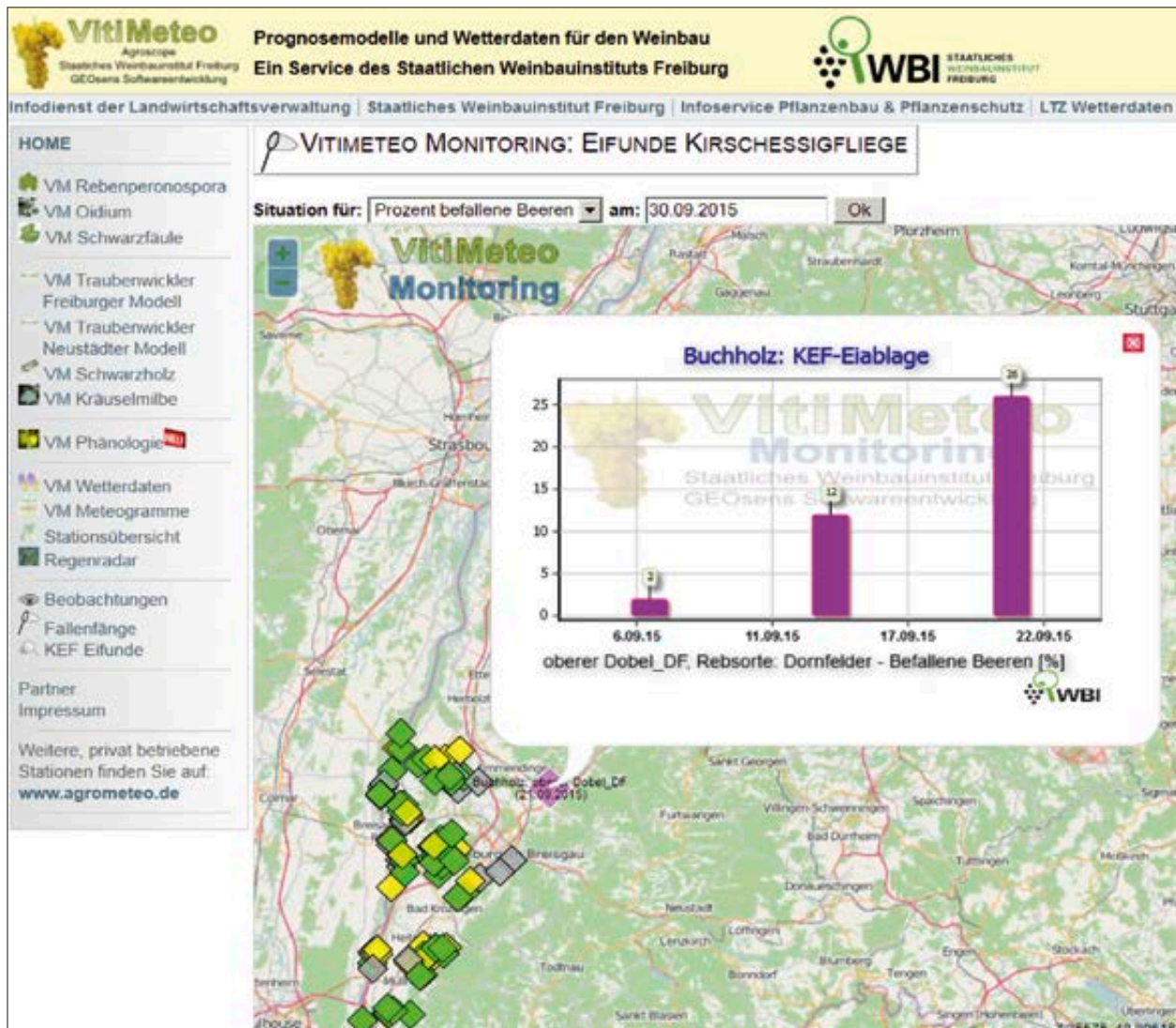
Das Prinzip für die Wiedergabe der Informationen ist bei allen Modellen gleich: schnell erfassbarer Überblick zum aktuellen Risiko einer Krankheit im ganzen Bundesland, gegliedert nach den Weinbaubereichen. Mit dem nächsten Klick können dann detaillierte Informationen für die einzelnen Wetterstationen abgerufen werden. Abbildung 6.8.30 zeigt ein Beispiel für das Resultat der Berechnungen des Risikos für die Rebenperonospora mittels einer Grafik. Mit ihr ist es

möglich, das aktuelle und vorhergesagte Risiko abzuschätzen und gezielt Fungizide einzusetzen. In Abbildung 6.8.31 sind die wesentlichen Daten für das Oidium-Risiko beispielhaft in einer Tabelle zusammengefasst. Sie gibt Auskunft über den Oidium-Index, die Wetterdaten und das Rebwachstum. Die siebentägige Prognose ist im unteren Bereich angegeben (aus Platzmangel nicht abgebildet). Mit Hilfe des aktuellen und des prognostizierten Oidium-Risikos (Index-Wert) kann die Terminierung der Applikation von Pflanzenschutzmitteln genauer erfolgen.

Einige Modelle des Prognosesystems „VitiMeteo“ wurden inzwischen in mehreren Ländern Mittel- und Südeuropas auf ca. 150.000 ha Weinbau mit über ca. 350 Wetterstationen eingeführt (Stand 2015) und in der Beratung genutzt.

Abb. 6.8.32: Ei-Funde der Kirschessigfliege auf Keltertrauben: Jedes Rautensymbol zeigt die Daten einer Rebfläche. Mittels Klick auf eine der Rauten wird eine Grafik geöffnet, die den zeitlichen Verlauf der Beobachtungen wiedergibt.

- ◆ keine Ei-Funde in Proben
- ◆ Ei-Funde in Proben
- ◆ Eintragung ist älter als 30 Tage (zum gewählten Zeitpunkt)



## Monitoring

Seit vielen Jahrzehnten arbeiten so genannte Rebschutzwarde im Rahmen eines Schaderreger-Monitorings mit den unabhängigen, staatlichen Weinbauberatern, den baden-württembergischen Regierungspräsidien sowie dem Staatlichen Weinbauinstitut Freiburg und der LVWO Weinsberg sehr eng zusammen. Diese erfolgreiche, bereits vorhandene Struktur des Monitorings im Weinbau wurde in die Internetplattform „VitiMeteo“ aufgenommen. Seit dem Jahr 2012 geben die Rebschutzwarde ihre Beobachtungen und Fallenfänge online ein. Die Feldbeobachtungen beinhalten derzeit Krankheiten und Schädlinge mit jeweils fünf Schadstufen, die Phänologie nach dem BBCH-Schema, Pflanzenschutzbehandlungen, Nährstoffmangelerscheinungen, Pflegemaßnahmen und Wetterereignisse. Eine essentielle Information ist die Eingabe des Erstbefalls des Falschen Mehltaus (Rebenperonospora) und des Echten Mehltaus (Oidium); auf dieser Basis wurde ein landesweites Frühwarnsystem etabliert (Bleyer et al., 2015). In gleicher Weise werden die Fangzahlen für den Einbindigen und den Bekreuzten Traubenwickler sowie für die Kirschessigfliege (*Drosophila suzukii*) in die Datenbank eingetragen. Ein Beispiel für die Veröffentlichung der Bonituren zur Eiablage der Kirschessigfliege ist in Abbildung 6.8.32 zu sehen.

## Praktische Nutzung und Ausblick

Die Feldbeobachtungen in den verschiedenen Weinbaubereichen Baden-Württembergs geben wichtige Informationen. Das tatsächliche Erstauftreten einer Krankheit oder eines Schädlings lässt sich jetzt erstmals in der Fläche mit den Simulationen vergleichen, so dass eine kontinuierliche Verbesserung der Modelle möglich ist. Auf der Basis der Kombination zwischen Prognosen und Beobachtungen können nachhaltige Bekämpfungsstrategien in der Praxis besser als bisher umgesetzt werden.

Das System wird auch in der Zukunft als variables, interaktives System für Berater und Winzer, aber auch Wissenschaftler im Sinne eines integrierten Pflanzenschutzes weiterentwickelt. Die Erfahrung mit dieser Informationsplattform zeigt, dass die Kommunikation zwischen Wissenschaft, Beratung und Praxis durch ihre Nutzung und Anwendung gefördert wird.

## Literatur

Berkelmann-Löhnertz, B., Braden, H., Ehlig, A., Forster, M., Frühauf, C., Gollmer, K.-U., Gorges, T., Kuczera, A., Loskill, B., K.-P. Wittich (2005): Schlussbericht des Forschungsberichtes „Optimierung der Peronospora-Prognose im Rebschutz auf der Basis eines erweiterten Prognosemodells“.

Berkelmann-Löhnertz B., Loskill, B.J., Frühauf, C., Gollmer, K.-U., Forster, M., Kuczera, A., Braden, H., Wittich, K.-P. (2006): Downy mildew forecast regarding primary and further soil borne infections based on a splash algorithm and a microclimate model. Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Workshop on Grapevine Downy and Powdery Mildew, 130.

Berkelmann-Löhnertz, B., Baus, O., Ehlig, A., Frühauf, C. (2016a): Peronospora-Prognose im Rheingau. Der Deutsche Weinbau 14,16-17.

Berkelmann-Löhnertz, B., Baus, O., Ehlig, A., Frühauf, C. (2016b): Entscheidungshilfe im Rebschutz – Peronospora-Prognose in Beratung und Lehre. das deutsche Weinmagazin 23/24, 30-33.

Bläser, M.; Weltzien, H. C. (1978): Die Bedeutung der Sporangienbildung, -ausbreitung und -keimung für die Epidemiebildung von *Plasmopara viticola*. Z. Pflanzenkrankh. Pflanzensch. 85 , 155 - 161.

Bläser, M.; Weltzien, H. C. (1979): Epidemiologische Studien an *Plasmopara viticola* zur Verbesserung der Spritzterminbestimmung. Z. Pflanzenkrankh. Pflanzensch. 86 , 489 - 498.

Bleyer, G., Kassemeyer, H.-H., Krause, R., Viret, O. & Siegfried, W. (2008): 'VitiMeteo-Plasmopara' – Prognosemodell zur Bekämpfung von *Plasmopara viticola* (Rebenperonospora) im Weinbau. Gesunde Pflanzen 60: 91-100.

Bleyer, K., Kast, W. K., Bleyer, G. (2013): Anwendung von Oidiag 3.0. im VitiMeteo-Oidium. Der Deutsche Weinbau 10: 32-35.

Bleyer, G., Kassemeyer, H.-H., Breuer, M., Krause, R., Augenstein, B., Viret, O., Dubuis, P.-H., Fabre, A.-L., Bloesch, B., Siegfried, W., Naef, A., Hill, G.K., Mattedi, L., Varner, M. (2014): Presentation of the VitiMeteo forecasting system – Current state at the 10th anniversary of the system Integrated protection and production in Viticulture, IOBC-WPRS Bulletin Vol. 105, pp. 113-123.

Bleyer, G., Breuer, M., Krause, R., Augenstein, B. (2015): Nachhaltige Anwendung von Pflanzenschutzmitteln. Der Deutsche Weinbau 14, 36-37.

Bleyer G., Molitor, D., Dubuis, P.-H., Krause, R., Augenstein, B. (2016): Arbeiten genauer planen mit VitiMeteo Phänologie, Der Deutsche Weinbau 14, 34-35.

Braden, H. (1995): The model AMBETI: A detailed description of a soil-plant-atmosphere model, Berichte des Deutschen Wetterdienstes 195, Offenbach am Main.

Dubuis, P. H.; Viret, O.; Bloesch, B.; Fabre, A. L.; Naef, A.; Bleyer, G.; Kassemeyer, H. H.; Krause, R. (2012): Lutte contre le mildiou de la vigne avec le modèle VitiMeteo-Plasmopara. Revue Suisse de Viticulture Arboriculture Horticulture 44(3): 192-198.

Duffner K. (1999): Untersuchungen zur Biologie, Morphologie und Bekämpfung der Kräuselmilbe *Calepitrimerus vitis* Nalepa 1905 (Acari, Eriophyoidea), Dissertation.

Erickson, R.O., Michelini, F.J. (1957): The plastochron index. Am. J. Bot. 44, 297-305.

- Hill, G. (1989a): Effect of temperature on sporulation efficiency of oilspots caused by *Plasmopara viticola* (Berk. et Curt., ex de Bary) Berl. et de Toni in vineyards. *Vitic Enol. Sc.*, 44, 86-90.
- Hill, G. (1989b): Das Peronospora-Risikoprognosemodell Oppenheim (P.R.O.) im Praxistest. *Der Deutsche Weinbau* 44, 514-517.
- Hoppmann, D., Wittich, K.-P. (1997): Epidemiology-related modelling of the leaf-wetness duration as an alternative to measurements, taking *Plasmopara viticola* as an example. *J Plant Diseases Protection* 104, 533-544.
- Kast, W.K. (1997): A Step by Step Risk Analysis (SRA) Used for Planning Sprays Against Powdery Mildew (OiDiag-System). *Vitic. Enol. Sci.* 52, 230-231.
- Kast, W.K. (2005): Oidium-Modelle zur Bewertung des Witterungseinflusses auf die Ausbreitung von Oidium – Stand der Forschung 2005. <https://www.landwirtschaft-bw.info/pb/Lde/669302> (abgerufen am 22.10.2016)
- Kast, W.K., Bleyer, K. (2010): The expert system OiDiag-2.2. – a useful tool for the precise scheduling of sprays against powdery mildew of vine (*Erysiphe necator*) Schwein. *Proceedings of the 6th International Workshop on Grapevine Downy and Powdery Mildew (Bordeaux)*, 151-154.
- Kast, W.K., Stark-Urnau, M., Bleyer, K. (2016): Ausbreitung der Schwarzholzkrankheit verhindern – Jetzt ist der optimale Zeitpunkt für die Brennesselbekämpfung. <http://www.lvwo-bw.de/pb/Lde/669386?LISTPAGE=669250> (abgerufen am 22.10.2016)
- Kuczera, A., Wittich, K.-P., Frühauf, C. (2004): Agrarmeteorologische Untersuchungen zur Spritzwasserdynamik. *Poster DACH-Tagung, Karlsruhe 2004, extended abstract, 6 Seiten.*
- Loskill, B.J., Gobbin, D., Berkelmann-Löhnertz, B. (2005): Bodenbürtige Peronospora-Infektionen. *Der Deutsche Weinbau* 7, 26-29.
- Loskill, B.J., Kuczera, A., Wittich, K.-P., Braden, H., Frühauf, C., Gollmer, K.-U., Forster, M., Berkelmann-Löhnertz, B. (2007): Neue Wege bei der Peronospora-Prognose – Mehr Licht in das Dunkel der Primärinfektion. *Deutsches Weinbau-Jahrbuch* 58, 76-81.
- Maixner, M., Langer, M. (2006): Prediction of the flight of *Hyalesthes obsoletus*, vector of stolbur phytoplasma, using temperature sums. *Integrated Protection in Viticulture, IOBC-WPRS Bulletin* 29(11), 191-196.
- Molitor, D. (2008): Untersuchungen zur Biologie und Bekämpfung der Schwarzfäule (*Guignardia bidwellii*) an Weinreben, Dissertation Universität Gießen.
- Molitor, D., Baus, O., Berkelmann-Löhnertz, B. (2011): Protective and curative grape black rot control potential of pyraclostrobin and myclobutanil. *J. Plant Dis. Prot.* 118, 161-187.
- Molitor, D., Frühauf, C., Baus, O., Berkelmann-Löhnertz, B. (2012): A Cumulative Degree-Day-Based Model to Calculate the Duration of the Incubation Period of *Guignardia bidwellii*. *Plant Disease* 96 (7), 1054-1059.
- Molitor, D., Beyer, M., Lippmann, G., Augstein, B., Dubuis, P.-H., Hill, G.K., Berkelmann-Löhnertz, B., Bleyer, G. (2014): Neue Entscheidungshilfe: VitiMeteo Schwarzfäule. *Der Deutsche Weinbau* 4, 20-22.
- Molitor D., Junk J., Evers D., Hoffmann L., Beyer M. (2014): A high resolution cumulative degree day based model to simulate the phenological development of grapevine. *American Journal of Enology and Viticulture* 65 [1], 72-80.
- Müller, K., Sleumer, H.O. (1934): Biologische Untersuchungen über die Peronosporakrankheit des Weinstockes mit besonderer Berücksichtigung ihrer Bekämpfung nach der Inkubationskalendermethode. *Landwirtschaftl. Jahrbücher*. Bd. 79, H. 4. Berlin: Parey.
- Ökolandbau (2016): Bekämpfung von Milben. <https://www.oekolandbau.de/erzeuger/pflanzenbau/spezieller-pflanzenbau/weinbau/pflanzenschutz/bekaempfung-von-milben/> (abgerufen am 22.10.2016)
- Roßberg (2013): Erhebung zur Anwendung von Pflanzenschutzmitteln in der Praxis im Jahr 2011. *Journal für Kulturpflanzen* 65 (4), 141-151.
- Schultz, H.R. (1992): An empirical model for the simulation of leaf appearance and leaf area development of primary shoots of several grapevine (*Vitis vinifera* L.) canopy systems. *Scientia Horticulturae* 52, 179-200.
- Schultz, H.R. (2003): Wachstumsmodell der Rebe: Jetzt wächst die Rebe auch am Bildschirm. *Das Deutsche Weinmagazin* 10, 28-31.
- Stark-Urnau, M., Kast, W.K. (1999): Development of ontogenetic resistance to powdery mildew in fruit of differently susceptible grapevines (cvs. Trollinger and Lemberger). *Mitteilungen Klosterneuburg* 49, 186-189.
- Wegner-Kiß (2003): Die Kräuselmilbe (*Calepitrimerus vitis*), ein ernstzunehmender Schädling im Weinbau, *Schweizerische Zeitschrift für Obst- und Weinbau* 10 (03), 9-12.
- Wittich, K.-P. (1993): Ansätze zur Abschätzung der Blattbenetzungsdauer. *DWD intern* 54 (Beiträge zur Agrarmeteorologie 1/93), Deutscher Wetterdienst, Offenbach, 44 Seiten.
- Vogt, E., Schruft, G. (2000): *Weinbau*. Eugen Ulmer: 322-328.



## 7 Beobachtungs- und Vorhersagefähigkeiten

Autoren: Kristina Fröhlich, Detlev Majewski, Marcus Paulat, Bernhard Reichert, Josef Wiedemann

Als Ursprung der Wettervorhersage werden häufig die detaillierten Wetterbeobachtungen und daraus abgeleiteten Vorhersagen des Abtes Moriz Knauer (1613-1664) angeführt. Knauer führte seine Arbeiten von 1652 bis 1658 im Kloster Langheim bei Lichtenfels in Oberfranken durch. Daraus entstand später der bis in die Gegenwart fortgeschriebene Hundertjährige Kalender. Die Zusammenstellung Knauers sollte ursprünglich dazu beitragen, das Wetter der Region Franken vorherzusagen, um die im Kloster betriebene Landwirtschaft zu optimieren.

Abt Knauer nahm irrtümlich an, dass sich die Wetterbedingungen aufgrund des Einflusses der damals bekannten 7 „Planeten“ (Sonne, Mond, Saturn, Jupiter, Mars, Venus und Merkur) in einem festen 7-jährigen Zyklus wiederholen. Somit stand seiner Theorie entsprechend eine Wettervorhersage für jeden Tag der kommenden 7-Jahres-Zyklen zur Verfügung. Auf dieser Basis erstellte er daraufhin die Wettervorhersagen der Jahre 1600 bis 1912. Möglich, dass diese Vorhersagen des Hundertjährigen Kalenders manchmal zutreffen, aber aus heutiger meteorologischer Sicht sind solche Übereinstimmungen rein zufälliger Natur und in keiner Weise wissenschaftlich begründet.

Aus Sicht des Landwirts wäre die Anforderung an die Wettervorhersage so zu beantworten, dass sie „das Wetter liefern soll, was am Hof benötigt wird“. Hinter einer solchen

Forderung steht der Wunsch nach Sicherheit in der täglichen Arbeit für die betriebliche Planung. Die betriebliche Planung erstreckt sich über die nächsten Stunden besonders für die Zeit der Ernte von Heu und Getreide, um zu wissen, wann der Regen oder eine Gewitterfront sich nähert (Kap. 7.2). Für die unmittelbare Arbeitsplanung meist bei den Arbeiten im Ackerbau werden möglichst genaue Vorhersagen bis zu einer Woche benötigt, um zu entscheiden, ob die Saat richtig ausgebracht werden kann oder ob die Pflegemaßnahmen und Ernte zum richtigen Zeitpunkt durchgeführt werden. Hier kann die richtige Entscheidung zum richtigen Zeitpunkt viel Geld sparen bzw. die gesamte Ernte retten und deren Qualität entscheidend beeinflussen (Kap. 7.3). Bei genauen allgemeinen und agrarmeteorologischen Vorhersagen über mehrere Wochen ließen sich Düngemittel und Pflanzenschutzmittel in Menge und Einsatzzeitpunkt effektiver zum Einsatz bringen, denn der Temperaturverlauf in der Verbindung mit den Niederschlagsmengen bestimmt die Freisetzung der im Boden vorhandenen Stickstoffmengen. Vorhersagen über eine ganze Vegetationsperiode wären für die Anbauplanung ebenfalls hilfreich, denn sie würden die Wahl der Pflanzenart und Sortenwahl wesentlich erleichtern und so das Risiko eines Ernteausfalls minimieren (Kap. 7.4). Die Anforderungen aus Sicht der Landwirte an die Wettervorhersage deckt somit die gesamte Zeitskala ab. In diesem Kapitel werden die unterschiedlichen Zeitskalen der Vorhersage behandelt und die Vorhersagegüte (Kap. 7.5 - 7.7) wird erläutert.

## 7.1 Wetterbeobachtungen

Für Mensch und Umwelt, von der privaten Planung bis zum Katastrophen- und Umweltschutz ist das Wetter von öffentlichem Interesse. Eine wesentliche Grundlage für alle meteorologischen Dienstleistungen ist die Messung und Beobachtung der Wettererscheinungen, d. h. die kontinuierliche Gewinnung und Bereitstellung meteorologischer Daten. Die gewonnenen Daten sind Grundlage für alle Folgeprozesse in der Wettervorhersage.

Die Messungen gliedern sich in Bodenbeobachtung, Atmosphärenbeobachtung und die Überwachung der Radioaktivität in der Atmosphäre. Abbildung 7.1 zeigt die Vielfalt der Beobachtungssysteme anhand einer schematischen Darstellung.

Die Bodenbeobachtung befasst sich mit der Erfassung und Aufzeichnung von Wetterdaten an bestimmten Orten zu festgelegten Zeiten oder kontinuierlich und schließt sowohl alle Wetterwarten und -stationen des hauptamtlichen Messnetzes wie auch die Messungen an Standorten ein, die teilweise noch von ehrenamtlichen Beobachtern betreut werden (nebenamtliches Messnetz).

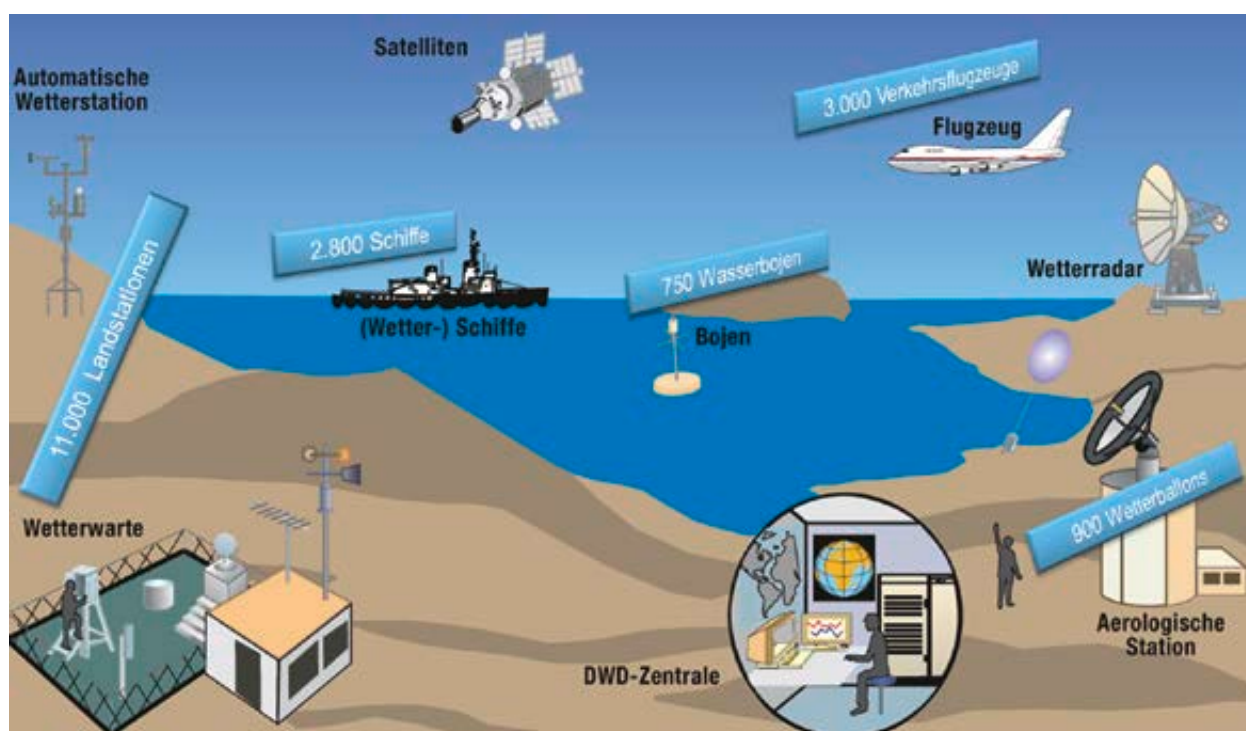
Zur Ergänzung dieser konventionellen Messungen werden seit über 30 Jahren Methoden der Fernerkundung eingesetzt. Der Schwerpunkt hierfür ist die Erfassung der Atmosphäre durch Wetterradarsysteme. Der DWD betreibt einen Radarverbund aus 17 operationellen Wetterradaren.

Wetterradarsysteme sind für die Meteorologie unverzichtbar. Um vor (Un)Wetter zu warnen, werden anhand von Wetterradarsystemen Reflektivitäten gemessen und Flächenniederschläge abgeleitet, Gewitter erkannt und von Meteorologen sowie unterstützenden Systemen des Nowcasting (Kap. 7.2) die Entwicklung und Verlagerung der Niederschlagsgebiete vorhergesagt. Naturgemäß schwieriger ist es, Informationen über den Zustand der Ozeane und von höheren Atmosphärenschichten zu bekommen. Hier wird versucht, möglichst viele repräsentative Informationen durch Schiffsmeldungen und Bojenmessungen sowie Wetterballons (Radiosonden) und Flugzeugmessungen zu sammeln.

Neben den aufgeführten Beobachtungssystemen ist in den letzten Jahrzehnten durch den Aufbau eines weltumspannenden Systems von Wettersatelliten auch ein weltraumgestütztes Beobachtungsnetz entstanden. Die meteorologische Datengewinnung hat dadurch an Qualität und Homogenität deutlich zugelegt. Satelliten sind heute eine bedeutende Datenquelle mit erheblichem Entwicklungspotential. Mehr als 75 % der in der globalen Wetteranalyse (Kap. 7.3) verwendeten Beobachtungsdaten stammen heutzutage von Satelliten.

Neben den Möglichkeiten, die die verschiedensten Beobachtungssysteme mit sich bringen, dürfen aber auch die Schwächen nicht verschwiegen werden. Jede Messung ist immer auch mit gewissen Unsicherheiten verbunden. Das Stationsnetz ist zwar über Deutschland gut verteilt, weist aber dennoch Lücken auf und ist in den Mittelgebirgsregionen nicht immer repräsentativ. Auch Produkte aus Radar-

**Abbildung 7.1: Schematische Darstellung über Beobachtungssysteme zur Erfassung des Zustands der Atmosphäre. Weltweit werden in der Zentrale des DWD Messdaten von Satelliten, Verkehrsflugzeugen, Schiffen, Wasserbojen, Wetterballons (Radiosonden), Wetterradaren, Wetterwarten und Landstationen gesammelt und weiterverarbeitet.**



und Satellitenmessungen unterliegen einigen messart-typischen Fehlerquellen bzw. bedürfen eines aufwändigen Datenaufbereitungsprozesses.

## 7.2 Vorhersagen für die nächsten Minuten bis wenige Stunden (Nowcasting)

Bei Vorhersagen für die nächsten Minuten bis wenige Stunden im Voraus geht es darum, kleinräumige Strukturen wie z. B. Starkregen, Hagel oder Böen in Verbindung mit Gewittern zu erfassen und mit guter Genauigkeit vorherzusagen. Vorhersagen auf dieser Zeitskala werden mit sogenannten Nowcasting-Verfahren erstellt.

Diese Verfahren basieren überwiegend auf der Extrapolation verfügbarer stationsbezogener Beobachtungsdaten sowie zeitlich und räumlich hochaufgelöster Radar- und Satelliteninformationen (vgl. Kap. 7.1). Dabei können Ergebnisse der letzten verfügbaren Modellrechnungen der numerischen Wettervorhersage (vgl. Kap. 7.3) mit eingehen. Durch verbesserte Vorhersage der nächsten Minuten bis Stunden und durch eine hohe Aktualisierungsrate (z. B. alle 5 Minuten) ergänzen Nowcasting-Verfahren die numerische Wettervorhersage.

Aus Niederschlagsradardaten, Methoden zur Gewitter-Zellerkennung und Abschätzung ihrer zukünftigen Verlagerung, 3-dimensionalen Radar-Bildern, Blitzerkennungssystemen, Meldungen von Stationen der Beobachtungsnetze sowie Prognosefeldern der numerischen Wettermodelle werden für den Nowcasting-Bereich optimierte, hochaktuelle Warnvorschläge vor Gewittern (und seinen Begleiterscheinungen), vor Starkregen sowie vor Schneefall erzeugt (Abb. 7.2). U.a. auf Basis solcher Warnvorschläge werden dann amtliche Warnungen durch die Meteorologen erstellt und an Endkunden weitergereicht.

## 7.3 Numerische Wettervorhersage (NWV)

Wettervorhersagen sind das Ergebnis einer aufwändigen Prozesskette (Abb. 7.3), deren Komponenten eng miteinander verzahnt sind. Am Anfang der Kette stehen weltweite Beobachtungen der Atmosphäre und Ozeane (vgl. Kap. 7.1). Diese Beobachtungen sind zur Bestimmung des Anfangszustandes für die Vorhersagerechnungen notwendig.

Der DWD entwickelt und betreibt auf seinen Hochleistungsrechnern komplexe numerische Wettervorhersagemodelle (NWV-Modelle) für die globale und regionale Prognose. Beim

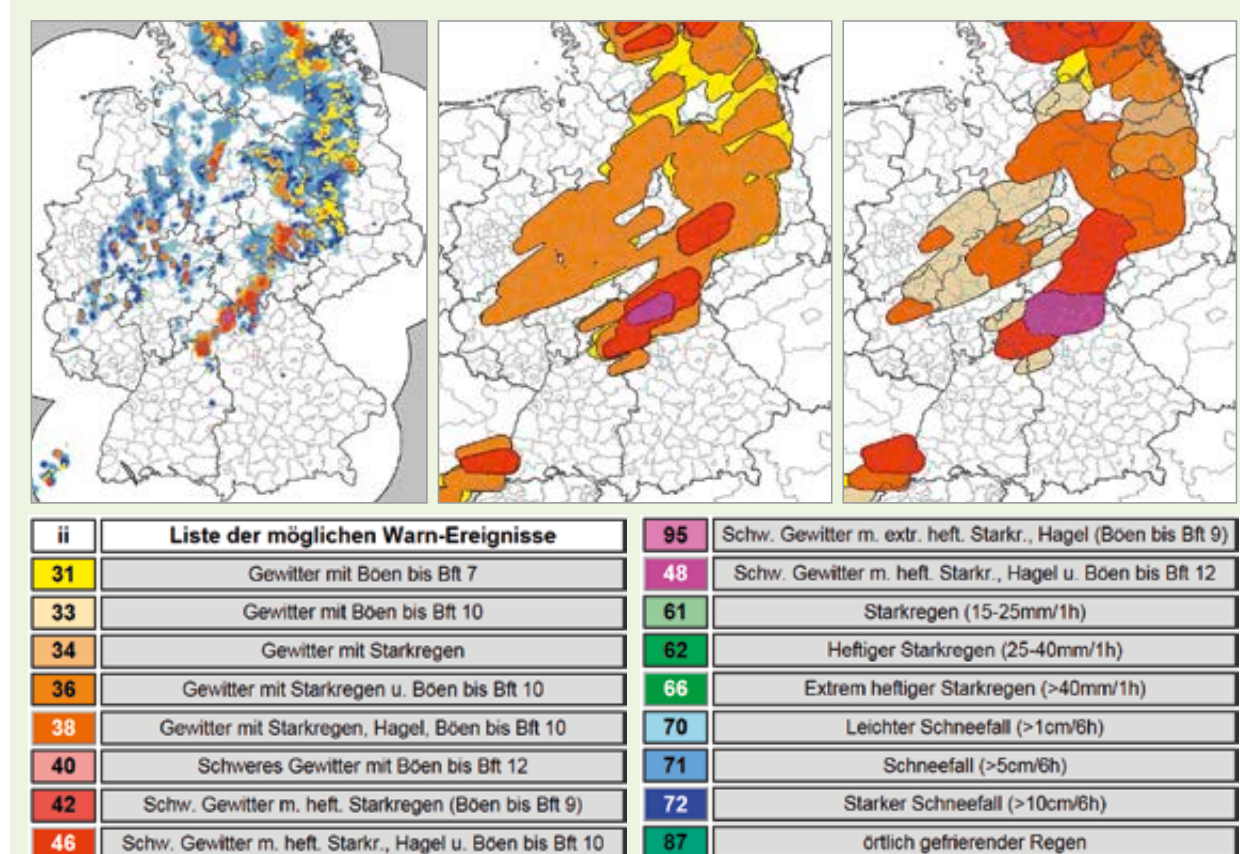
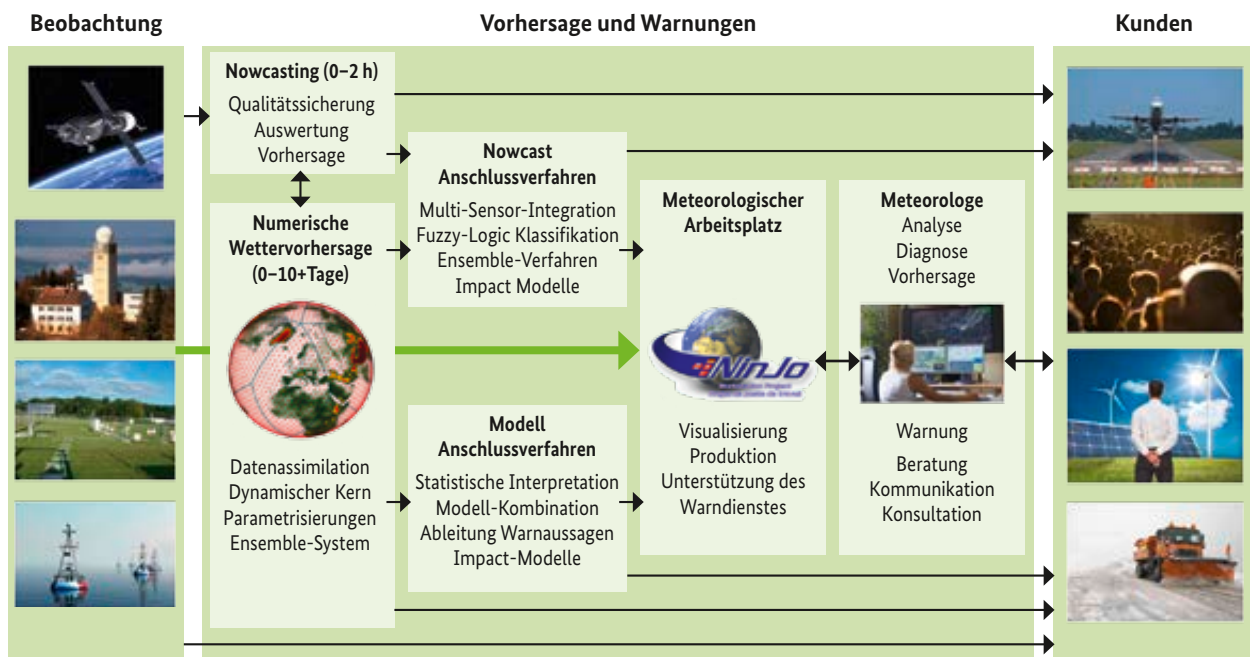


Abbildung 7.2: Aufbau eines Warnvorschlags für Gewitter mit Hilfe des DWD-Verfahrens „NowCastMIX“: Beispiel mit schweren Gewittern am 5. Juli 2015. Oben links: Analyse des Gewitters auf Grundlage von Radardaten. Oben Mitte: Gewitterzellen und deren Stärke mit Verlagerung für die nächsten 60 Minuten, wie in der WarnWetterApp des DWD dargestellt. Oben rechts: zeitlich integrierter Warnvorschlag für die nächsten 60 Minuten als Grundlage für amtliche Warnungen. Unten: Liste möglicher Warnereignisse.

Abbildung 7.3: Der Wettervorhersageprozess von den weltweiten Beobachtungen bis zu den Kundenprodukten.



Einsatz der NWV-Modelle unterscheidet man zwischen deterministischer und probabilistischer Vorhersagerechnung. Bei der deterministischen Vorhersage berechnet das NWV-Modell ausgehend von einem Anfangszustand (Analyse) eine zukünftige Wetterentwicklung. Für die probabilistische Vorhersage, im Kontext der NWV auch Ensemble-Vorhersage genannt, werden gleichzeitig, ausgehend von mehreren leicht unterschiedlichen Anfangszuständen, mehrere Modellrechnungen durchgeführt. Auf diese Weise gelingt es, verschiedene mögliche Wetterentwicklungen zu erfassen und die Unsicherheit der Vorhersage im Einzelfall besser abzuschätzen.

Die NWV-Modelle basieren auf physikalischen Gesetzmäßigkeiten wie der Erhaltung von Masse, Impuls und Energie. Um das komplizierte System der Modellgleichungen auf Computern zu lösen, setzt der DWD Gitterpunktmodelle ein, bei denen die zeitliche Entwicklung der Modellvariablen in einem dreidimensionalen räumlichen Gitter berechnet wird, das vom Erdboden bis zu einem vorgegebenen Modelloberrand reicht. Eine wesentliche Kenngröße ist dabei die Maschenweite des Gitters, d. h. der horizontale Abstand zweier benachbarter Gitterpunkte. Je kleiner die Maschenweite, desto detaillierter kann das Wettervorhersagemodell den Erdboden und atmosphärische Strukturen erfassen. Der Abstand der Gitterpunkte in der Vertikalen, Schichtdicke genannt, variiert von wenigen Metern in Bodennähe bis zu mehreren Hundert Metern für die oberen Modellschichten.

Das Globalmodell ICON (Abb. 7.4 links) berechnet weltweit mit einer Maschenweite von 13 km (für Europa beträgt die Maschenweite 6,5 km) auf 90 Schichten in der Vertikalen an insgesamt 265 Millionen Gitterpunkten (über Europa 39,5 Millionen Gitterpunkte) die zeitliche Entwicklung von Wetterparametern wie Luftdruck, Wind, Wasserdampf, Wolken

und Niederschlag. Ausgehend von den Analysen für 00 und 12 UTC erstellt ICON eine 180-Stunden-Vorhersage, wozu es nur eine Stunde Rechenzeit benötigt. Für 06 und 18 UTC berechnet ICON eine 120-Stunden-Vorhersage.

Das hochauflösende Regionalmodell COSMO-DE für Deutschland und Anrainerstaaten (Abb. 7.4 rechts) erstellt mit einer Maschenweite von nur 2,8 km und 50 Schichten an insgesamt 9,7 Millionen Gitterpunkten zusätzlich achtmal täglich, ausgehend von den Analysen für 00, 03, ..., 18 und 21 UTC, 27-stündige (45-stündige für 03 UTC) Vorhersagen vor allem zur Warnung vor gefährlichen Wettererscheinungen wie Gewittern und Stürmen. Die seitlichen Randwerte für COSMO-DE stammen vom ICON-Modell.

Als wesentliche Ergänzung der deterministischen Modellkette ICON und COSMO-DE betreibt der DWD operationell das Ensemble-Vorhersagesystem COSMO-DE-EPS, das achtmal täglich, ausgehend von den Analysen für 00, 03, ..., 18 und 21 UTC, zwanzig verschiedene 27-stündige (45-stündige für 03 UTC) Modellrechnungen (Ensemble-Member genannt) durchführt, die sich durch leicht unterschiedliche Anfangs- und Randwerte sowie Modellkonfigurationen unterscheiden.

Aus den zwanzig verschiedenen Vorhersageergebnissen werden verschiedene Ensemble-Produkte abgeleitet (z. B. Wahrscheinlichkeiten), um die aktuelle Vorhersageunsicherheit abzuschätzen.

Im zweiten Halbjahr 2017 soll das Ensemble-Vorhersagesystem ICON-EPS, basierend auf 40 verschiedenen ICON-Modellrechnungen der Maschenweite 40 km (über Europa 20 km), in den operationellen Betrieb überführt werden und viermal täglich fünf- bis siebentägige probabilistische Vor-



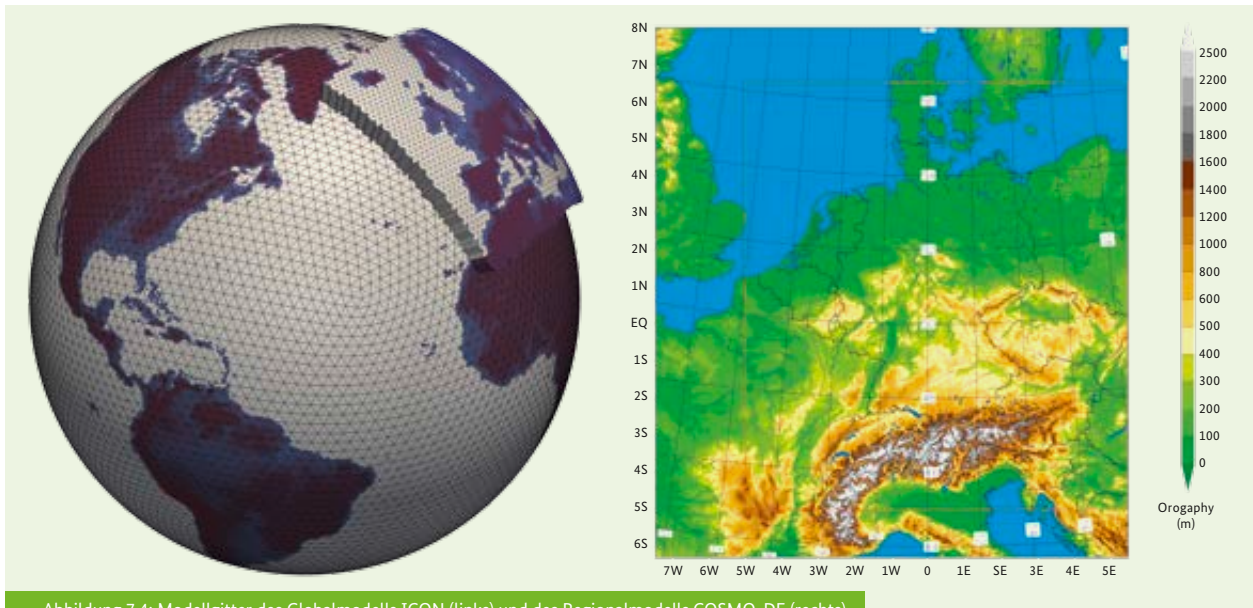
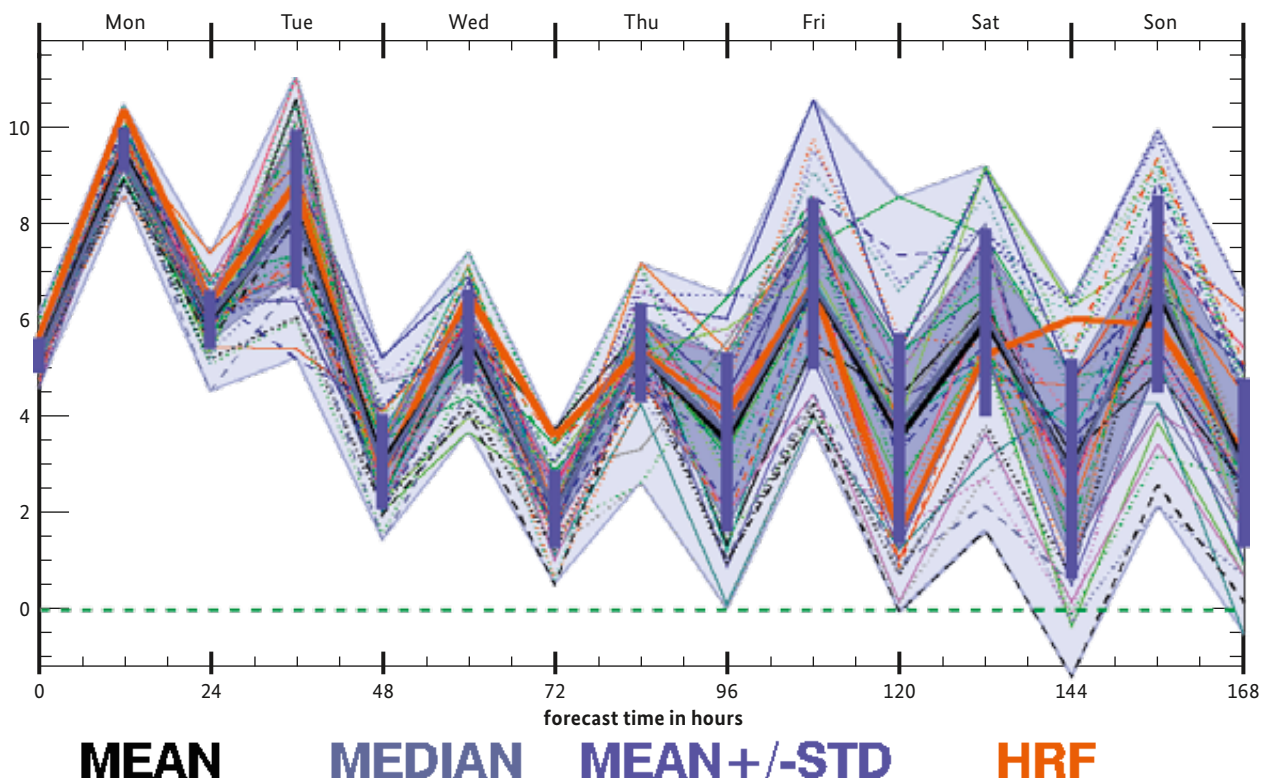


Abbildung 7.4: Modellgitter des Globalmodells ICON (links) und des Regionalmodells COSMO-DE (rechts).

hersagen (Abb. 7.5) bereitstellen. Die Standard-Abweichung (vertikale blaue Balken), berechnet aus den Vorhersagen der 40 ICON-EPS-Member, ist ein gutes Maß für die von der Vorhersagefrist, Wetterlage und Region abhängigen Vorhersageunsicherheit. Sie ergänzt die deterministische ICON-Vorhersage mit 13 km Maschenweite (in Abb. 7.5 mit HRF bezeichnet).

Die Daten der Wettervorhersage werden für die Meteorologen verdichtet, qualitätsgeprüft und grafisch aufbereitet. Die Wettervorhersagen werden schließlich an die verschiedenen Kunden in Deutschland und weltweit verteilt.

Abbildung 7.5: ICON-EPS Vorhersage der 2 m-Temperatur für Frankfurt, ausgehend vom 08.02.2016 00 UTC. MEAN: Ensemble Mittelwert, MEDIAN: 50 % Perzentil, MEAN±STD: Mittelwert ± Standardabweichung, HRF: High Resolution Forecast (hochaufgelöster deterministischer Lauf des ICON-Modells), dunkelgrau schattierte Bereiche werden durch das 25 % und 75 % Perzentil begrenzt.



**MEAN**      **MEDIAN**      **MEAN+/-STD**      **HRF**

## 7.4 Vorhersage auf saisonalen und dekadischen Skalen und Klima-Projektion

Soll die Entwicklung der Witterung bzw. des Klimas weiter als einige Tage in die Zukunft betrachtet werden, wird zwischen Klimavorhersagen und Klimaprojektionen unterschieden.

Klimavorhersagen berechnen auf einer Zeitskala von Monaten, Jahreszeiten bis Dekaden Prognosen, mit welcher Wahrscheinlichkeit es in den kommenden Monaten oder Jahren wärmer/kälter oder auch trockener/feuchter als im langzeitlichen Mittel wird. Der Referenzwert für das langzeitliche Mittel und seine Abweichungen (Variabilität) wird aus den Beobachtungen mit Hilfe der Statistik erstellt. Damit unterscheidet sich die Klimavorhersage grundlegend von der Wettervorhersage, die Prognosen über detailliertes Wettergeschehen der nächsten Stunden bis Tage trifft.

Klimaprojektionen hingegen liefern eine Abschätzung der Änderung des Klimamittelwertes und damit einhergehender Abweichungen im allgemeinen Verhalten des (wärmeren) Klimas. Die Zeiträume liegen hier im Bereich von 30 bis zu 100 Jahren. Klimaprojektionen werden durch verschiedene Szenarien eines möglichen Anstiegs der Konzentration der Treibhausgase in der Atmosphäre berechnet.

Für die Erstellung solcher Vorhersagen und Projektionen wird nicht nur ein Modell für die Atmosphäre wie in der Wettervorhersage verwendet, sondern alle Komponenten des Klimasystems werden berücksichtigt. Erst im Zusammenspiel von Atmosphäre, Land, Ozean und Meereis ist es möglich, auf längeren Zeitskalen Prozesse vorhersagbar zu machen. Diese Komponenten nehmen aus der Atmosphäre Niederschlag, Windeinflüsse und Sonnenenergie auf, speichern Wasser und Wärme und geben diese zu vielleicht viel späteren Zeitpunkten wieder ab. Solche „Informationen“ versorgen und steuern das Klima in der Atmosphäre im Laufe einer längeren Vorhersage und geben so auch dem chaotischen Verhalten eine Struktur. Sie bilden gewissermaßen eine Art Langzeit-Gedächtnis für die Atmosphäre. Die Kenntnis der (weltweiten) Bodenbeschaffenheit und anderer Eigenschaften führt dazu, dass mit einem guten Modell des Bodens und der Landoberfläche die Atmosphäre über einen langen Zeitraum hinweg die richtigen Informationen erhält. Der Ozean wiederum hat eine 1000-mal höhere Wärmekapazität als die Atmosphäre und stellt somit einen riesigen Wärmespeicher dar. Durch die Ozeanströmungen wird die aufgenommene Wärme nicht nur gespeichert, sondern auch transportiert und so auf andere Regionen der Erde umverteilt. Ein Ozeanmodell ist deshalb für alle Langfristprognosen eine essentielle Komponente des Vorhersagesystems.

### 7.4.1 Von den Anfangs- zu den Randbedingungen

Für Prognosen im Bereich von Jahreszeiten oder auch Jahren ist die Kenntnis des aktuellen Zustandes von Atmosphäre, Land und Ozean entscheidend. Je länger der Zeitraum der Prognose (z. B. bis zu 100 Jahren), desto unwichtiger ist der detaillierte Ausgangszustand, umso wichtiger wird jedoch die Berücksichtigung des Anstiegs der Treibhausgase in der Atmosphäre. Eine hohe Konzentration dieser Gase (z. B. CO<sub>2</sub> oder Methan) führt nicht nur zum Aufheizen der Atmosphäre, sondern auch des Ozeans und hat darüber vielfältige Konsequenzen auf Wetter und Klima. Dies wird mit Hilfe von Klimaprojektionen abgeschätzt.

### 7.4.2 Forschung und Anwendung der Klimavorhersagen

Gemeinsam mit dem Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M) und der Universität Hamburg (UHH) entwickelt und betreibt der DWD ein System zur Jahreszeitemvorhersage. Damit werden zukünftig im Routinebetrieb globale Jahreszeitemvorhersagen erstellt und der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt. Die Grundlage dafür bildet das Erd-System-Modell des Max-Planck-Instituts für Meteorologie (MPI-ESM). Diese Konfiguration wurde auf die Bedürfnisse der Jahreszeitemvorhersage angepasst und erhält deshalb einen neuen Namen: GCFS (German Climate Forecast System).

Das MPI-M und die Universität Hamburg bringen hierfür ihre Expertise auf dem Gebiet der Klimamodellierung ein. Der DWD ergänzt das Expertenwissen durch seine Erfahrungen im operationellen Betrieb der Modellvorhersage, der Qualitätsbewertung sowie der Nutzerprodukte.

Im Rahmen eines großen Forschungsprojektes (MiKlip: Mittelfristige Klimaprognosen) in der Bundesrepublik Deutschland wird zudem ein dekadisches Vorhersagesystem entwickelt, welches der DWD nach erfolgreicher Beendigung operationell betreiben wird.

## 7.5 Vorhersagefehler und Unsicherheitsabschätzung

Die Vorhersageunsicherheiten beruhen auf folgenden Faktoren:

- Die Beobachtungsdaten, welche die Anfangswerte für die Modelle liefern, sind nicht flächendeckend vorhanden, stammen von unterschiedlichen Messverfahren und weisen Fehler auf.
- Die Gleichungen, welche die atmosphärischen Prozesse beschreiben, weisen die Atmosphäre als ein nichtlineares System aus. Geringe Änderungen der Anfangsbedingungen können ganz verschiedene Endergebnisse zur Folge haben. Dies nennt man auch das chaotische Verhalten der Atmosphäre.

- Die Computer sowie die numerischen Modelle für Wetter- und Klimavorhersagen arbeiten mit Vereinfachungen der Gleichungen und müssen damit immer kleine Fehler in Kauf nehmen.
- Die physikalischen Prozesse in Atmosphäre, Land, Ozean und Meereis können oft ebenso nur vereinfacht dargestellt werden oder sind zum Teil noch nicht ausreichend erforscht.

Jede Vorhersage enthält folglich zwar immer eine möglichst gute Beschreibung des zukünftigen Wetters, aber auch Unsicherheiten, die mit der Zunahme des Vorhersagezeitraums wachsen. Die Abschätzung der Unsicherheit einer Prognose wird durch die Methode der Ensemble-Vorhersage angegangen. Die Berechnung der Vorhersagen wird mit leicht unterschiedlichen Bedingungen mehrfach wiederholt (vgl. Abschnitt 7.3) um zu bewerten, wie groß der Einfluss der möglichen oben genannten Fehler zum jeweiligen Startzeitpunkt sein kann oder wie stark sich unterschiedliche Konfigurationen während der Berechnung auswirken. Für Klimavorhersagen ist es wichtig, dieses Verfahren bereits in der Vergangenheit anzuwenden, um auf die Qualität der zukünftigen Vorhersagen zu schließen. Oft werden dazu nicht nur Lösungen eines Wetter-/Klimamodells, sondern auch die vieler verschiedener Modellsysteme herangezogen.

## 7.6 Qualität der Vorhersageprodukte

Aufbauend auf Modellvorhersagen können weitere mathematische Methoden helfen, durch ein statistisches Nachprozessieren im Mittel verbesserte Vorhersageprodukte zu generieren. Dieses Nachprozessieren wird im DWD als Model Output Statistics (MOS) bezeichnet. Mit Hilfe möglichst langer Zeitreihen (sogenannten Trainingsdaten) kann ein

statistischer Zusammenhang zwischen Modellvorhersage und Beobachtung hergestellt werden. So ist es etwa möglich, systematische Fehler der Vorhersage zu identifizieren und in zukünftigen Vorhersagen im Mittel zu eliminieren. Weiter berechnet MOS durch Interpolation der Gitterpunkt-Informationen der NWV Vorhersagen für im Prinzip jeden beliebigen Standort und jede beliebige Vorhersagegröße. Um konkrete Aussagen zur Qualität solcher standortbezogenen Vorhersagen machen zu können, muss man sich zunächst über die eigene Fragestellung im Klaren sein.

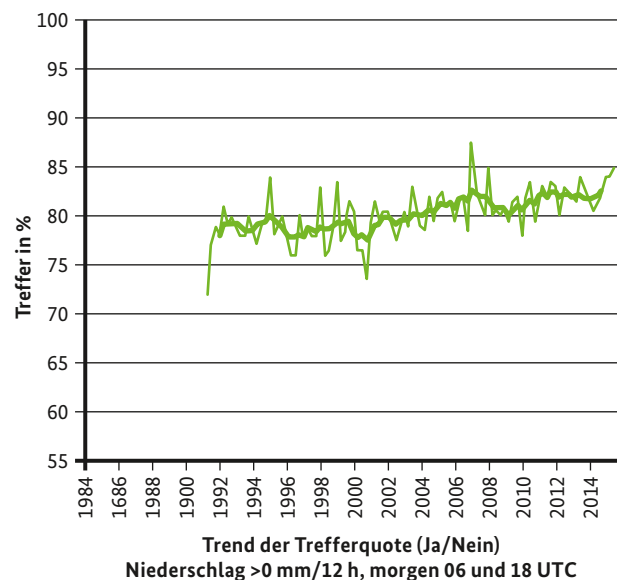
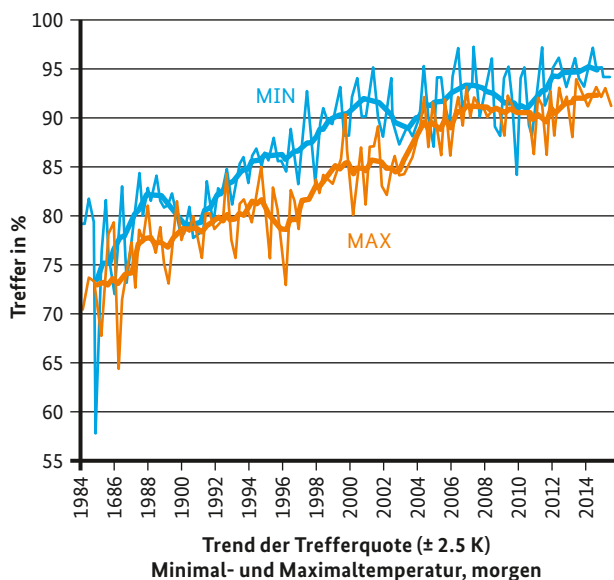
- An welchen meteorologischen Elementen ist man interessiert?
- Welche Vorhersagezeiträume werden betrachtet: die nächsten Stunden, der nächste Tag oder „Samstag in 8 Tagen“?
- Soll die Vorhersage für einen ganz bestimmten Ort untersucht werden oder reicht eine Aussage für die betreffende Region aus, etwa einen Landkreis?

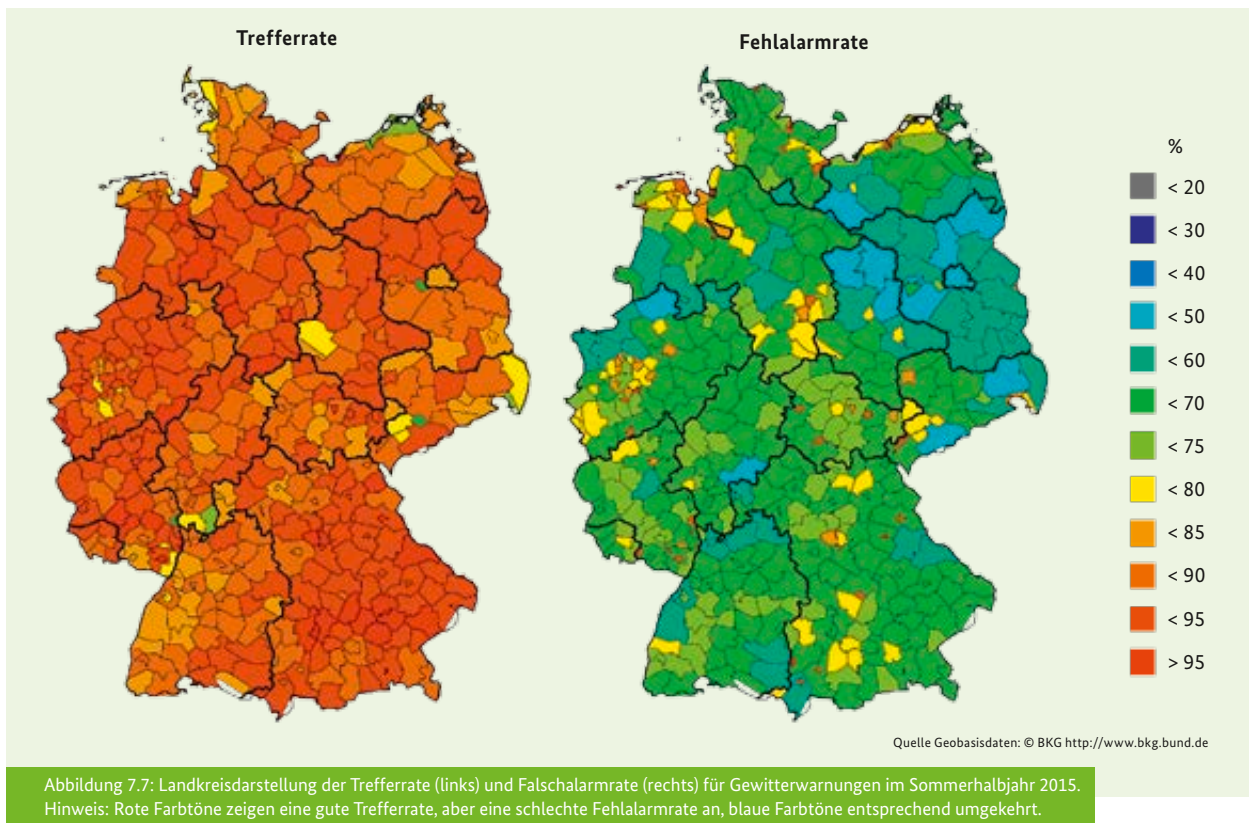
Vorhersagen lassen sich für alle diese Fragestellungen bereitstellen. Sofern man nun genügend gute Beobachtungen vorliegen hat, kann man im Prinzip für all diese Fragestellungen gewisse Qualitätsaussagen machen.

Abbildung 7.6 zeigt genau diese Art der Auswertung für gemittelte Quartalswerte eines ausgewählten Stationskollektivs als Zeitreihe für Extremtemperaturen (Minimum und Maximum der 2 m-Temperatur am nächsten Tag) und 12-stündigen Niederschlag (Ja/Nein Vorhersagen).

Eine Möglichkeit, die Qualität der Wettervorhersagen zu bewerten, ist die Definition einer Fehlertoleranz. Beispielsweise können Temperaturvorhersagen für morgen als „Treffer“ bewertet werden, wenn sie nicht weiter als  $\pm 2,5$  K von der Beobachtung abweichen.

**Abbildung 7.6: Entwicklung der Treffer von Vorhersagen für morgen. Die Fehlertoleranz für Temperaturen ist hier  $\pm 2,5$  K (links), für Niederschlag (rechts) ist die Überschreitung von 0 mm/12 h maßgeblich. Dünne Linien zeigen den Verlauf der Quartalsergebnisse, dickere Linien das gleitende Mittel.**





Sichtbar werden durch das jeweilige Wettergeschehen begründete saisonale Schwankungen, aber im Trend auch eine mehr oder weniger stetige Verbesserung der Güte der Vorhersage. Für Temperaturen erreicht der DWD inzwischen Treffer in über 90 % der Fälle. Für Niederschlag innerhalb von 12 Stunden ist der Trend allerdings nur leicht steigend. Die Vorhersage hierfür an einem ganz bestimmten Ort ist ungleich schwieriger und es bleibt trotz aller Anstrengungen gerade auch in der Niederschlagsvorhersage eine Herausforderung, die Qualität statistisch nachweisbar zu verbessern.

Möchte man Vorhersagen betrachten, die weiter als einen Tag in die Zukunft reichen, muss mit kontinuierlich abfallender Qualität gerechnet werden. Je weiter der Blick in die Zukunft geht, desto schwieriger werden verlässliche Aussagen. Besonders mittelfristige Vorhersagen (mehrere Tage in die Zukunft) sollten auch immer eine Angabe der Unsicherheitsbereiche beinhalten (vgl. Abb. 7.5) und durch probabilistische Methoden geprüft werden.

Ein wichtiges Vorhersageprodukt sind z. B. auch die Gewitterwarnungen des Deutschen Wetterdienstes. Aktuell werden sie in der Regel für Landkreise ausgegeben. Anders gesagt: der DWD warnt davor, dass irgendwo in einem Landkreis ein Gewitter auftritt.

Besonders schwierig ist die Bestimmung der Vorhersagegüte für sehr kleinräumige Ereignisse wie beispielsweise Tornados. Warnungen vor solchen Ereignissen werden oft für einen ganzen Landkreis ausgegeben, betreffen aber häufig nur einen kleinen Teil dieses Landkreises. Steht dann die

Wetterstation in dem Teil des Landkreises, der nicht von dem Ereignis betroffen war, wird die Warnung u.U. als falsche Warnung (Fehlalarm) eingestuft, obwohl sie richtig war.

Für Gewitter gibt es allerdings flächendeckende Informationen, etwa durch Radarinformationen oder durch Blitzortungssysteme.

In Abbildung 7.7 ist ein Ergebnis für Gewitterwarnungen im Sommerhalbjahr 2015 gezeigt. Grundlage sind alle Warnungen vor Gewitter im Vergleich zu beobachteten Blitzen in einem Landkreis. Die Stärke des Gewitters spielt in diesem Beispiel keine Rolle.

Man erkennt für die Trefferrate überwiegend rötliche Farbtöne, was einer mittleren Trefferrate von über 85 % pro Landkreis entspricht. Es wäre ein Leichtes, diese Trefferrate auf nahe 100 % zu schrauben, indem man schlicht immer vor Gewitter warnt. Da der DWD aber glaubhaft bleiben will, muss auch immer die Falschalarmrate berücksichtigt und in einem möglichst erträglichen Rahmen gehalten werden. Erst das Zusammenspiel von Treffer- und Falschalarmrate ermöglicht eine Aussage über die Qualität von Warnungen.

Für das Sommerhalbjahr 2015 wurde im Mittel pro Landkreis eine Falschalarmrate um 65 % erzielt. Eine gewisse Überwarnung ist dabei durchaus gewollt bzw. im Sinne der Nutzer gerechtfertigt. Hinzuzufügen ist für Gewitterereignisse zudem, dass sich diese häufig sehr kurzfristig entwickeln (oder auch wieder abschwächen) und somit schwer vorhersagbar sind.

## 7.7 Aktuelle Güte der Langfristprognosen

### 7.7.1 Güte der Jahreszeitenvorhersage

Alle oben angeführten Punkte zusammengenommen - die Unsicherheiten in Technik und Wissenschaft, das Klimamodell, die Ensemblevorhersagen, die von einer Klimatologie ausgehenden Tendaussagen - machen Jahreszeitenvorsagen möglich, aber noch nicht weltweit überall gleich gut. Gerade über Europa und Eurasien sind sie extrem schwierig. Dabei sind Trendprognosen der Temperatur häufig besser als jene für den Niederschlag.

Auch wenn in absehbarer Zukunft Jahreszeitenvorhersagen ein großes Potential haben, sie werden als Wahrscheinlichkeiten für jahreszeitliche Trends auftreten. Der Umgang mit Wahrscheinlichkeiten wird für den Umgang mit Wetter- und Klimaprognosen ein wichtiger Bestandteil sein. Für die richtige Interpretation eines jahreszeitlichen Trends ist deshalb die Kenntnis der Güte der Vorhersagen sowie die Verlässlichkeit der Wahrscheinlichkeitsprognosen unerlässlich. Als verlässlich wird eine Wahrscheinlichkeitsaussage dann bewertet, wenn nachgewiesen werden kann, dass in der Vergangenheit das mit xy % vorhergesagte Ereignis auch wirklich zu xy % eingetroffen ist. Nur dann ist eine Kosten-Nutzenabwägung sinnvoll, wie im Exkurs „Umgang mit Wahrscheinlichkeitsaussagen“ vorgeführt. Abbildung 7.8 zeigt eine Einstufung in 5 Kategorien für die saisonalen Niederschlagsprognosen des deutschen Modells GCFS.

Aufgeteilt in verschiedene Regionen weltweit rangiert die Verlässlichkeit solcher Prognosen zwischen „Perfekt“ und „Gefährlich“. Mit gefährlich ist an dieser Stelle das Ausmaß von möglichen Fehlentscheidungen, verursacht durch eine Fehlvorhersage, gemeint.

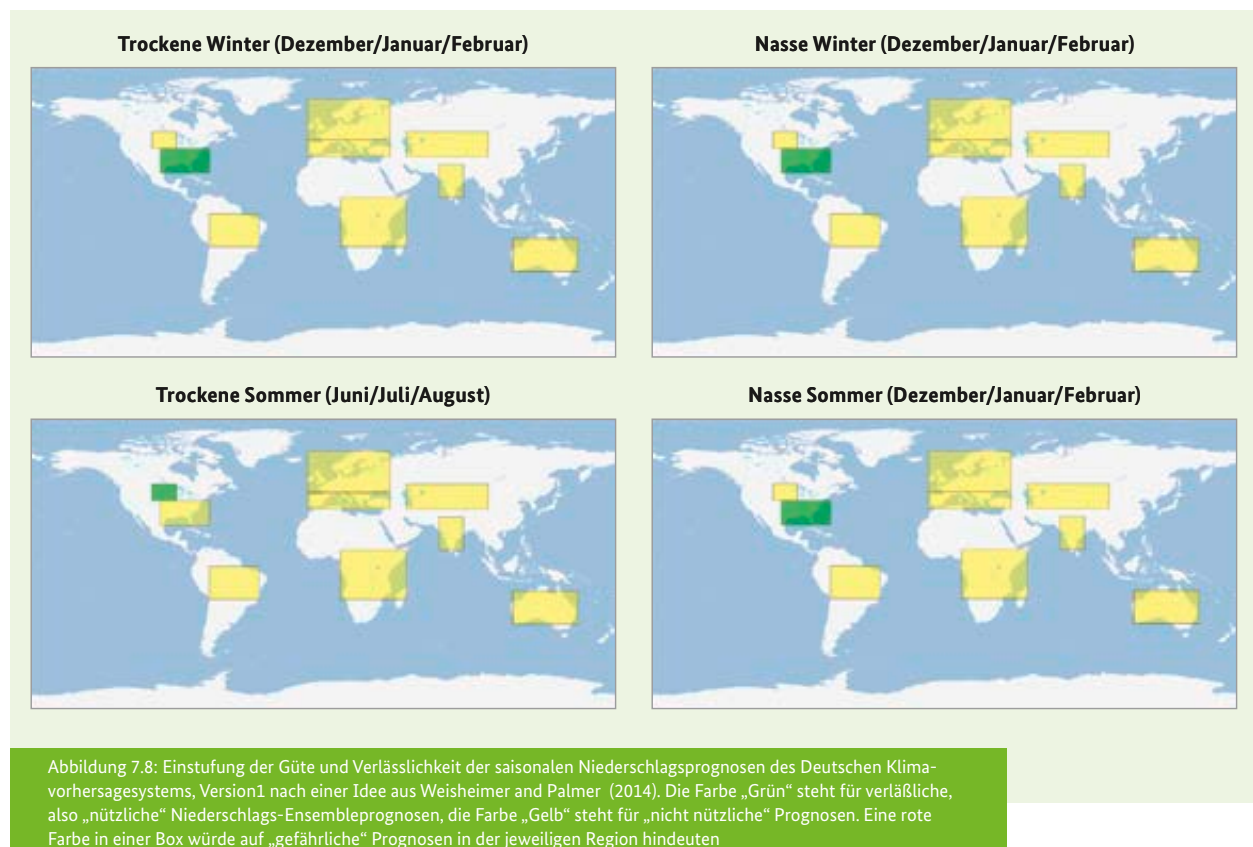
### 7.7.2 Dekadische Vorhersagen

Die Unsicherheit der dekadischen Vorhersagen ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch groß und wird trotz baldiger operationeller Vorhersagen vor allem ein aktiver Gegenstand der Forschung sein.

### 7.7.3 Klimaprojektionen

Dass sich die mittlere Temperatur der Erde bei weiter steigenden Treibhausgasen erhöhen wird, ist eine von vielen Modellen bestätigte Erkenntnis. Große Unsicherheiten bestehen beim Übertragen dieser Erkenntnis auf lokale Regionen.

Es besteht großes Interesse an Aussagen zur zukünftig in Deutschland zu erwartenden Veränderung. Die Daten der Klimamodelle dienen deshalb im Rahmen von Projekten und Studien als Eingangsgrößen für verschiedene Wirkmodelle. Ergebnis dieser Auswertungen sind z. B. der Klimaatlas und Untersuchungen zum Auftreten agrarrelevanter Extremwetterlagen (siehe Kapitel 8.2 und 8.4).



**Exkurs: Bauernregeln vs. Wetter oder Klima?**

Bauernregeln stellen die ersten Versuche einer Wetter- oder Klimavorhersage dar. Ihnen zugrunde liegen jahrelange sorgfältige Beobachtungen und Zuordnungen des jeweils lokalen Wetterverhaltens.

Die statistische Eintrittswahrscheinlichkeit dieser „Wenn-Dann“-Beziehungen ist umso größer, je stärker der dahinterstehende meteorologische Prozess alle anderen Wettereinflüsse überlagern kann und die Randbedingung eine Bauernregel auch nur in der zugehörigen Region zu verwenden. Ein gutes Beispiel ist der Siebenschläfer mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit von um die 70 %. Die zu dieser Zeit Ende Juni auftretende Großwetterlagen sind von einer beträchtlichen Erhaltungsneigung (dauerhafte Großwetterlage) geprägt und geben somit den Witterungscharakter der folgenden Wochen vor. Bauernregeln sind also regionale Klimastatistiken.

**Exkurs: Umgang mit Wahrscheinlichkeitsinformationen**

Der Deutsche Wetterdienst meldet für den kommenden Tag eine Wahrscheinlichkeit von 20 % für Bodenfrost für einen für den Kunden interessanten Ort. Wie ist diese Information zu interpretieren?

Zunächst muss man die Definition solcher Wahrscheinlichkeitsangaben kennen: In 20 % der ähnlich gearteten Wettersituationen ist mit Bodenfrost zu rechnen. Diese Wahrscheinlichkeit erscheint zunächst nicht besonders hoch. Es gilt aber abzuwägen, wie gefährdet eine geplante Tätigkeit oder etwa die Ernte durch Bodenfrost ist.





## 8 Agrarmeteorologische Beratung für die Politik

*Autoren: Christoph Burose, Beate Berkelmann-Löhnertz, Cathleen Frühauf, Claudia Heidecke, Kirstin Marx, Torben Meinert, Wolfgang Janssen, Saskia Pietzsch*

Die bereits beschriebenen agrarmeteorologischen Daten und Modelle dienen auch als Grundlage für die Beratung der Politik bzw. der Gesellschaft. Politikrelevante Beratungsaufgaben umfassen beispielsweise die Beteiligung an gesetzlichen Regelwerken, die Bewertung extremer Witterungssituationen oder die Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Landwirtschaft. Hierbei arbeiten verschiedene Institutionen, wie die nachgeordneten Behörden des BMEL, der Deutsche Wetterdienst und diverse Universitäten und Forschungseinrichtungen eng zusammen.

Durch die in den letzten Jahren intensivierte Zusammenarbeit hat sich am Campus Braunschweig ein Kompetenzzentrum für agrarrelevantes Wetter entwickelt. Dort arbeiten

Fachleute des Deutschen Wetterdienstes (DWD), des Julius Kühn-Institut (JKI) und des Johann Heinrich von Thünen-Institut (Thünen-Institut) disziplinübergreifend zusammen. So können politische Entscheidungen sowohl bei akuten Katastrophen und Extremwetterereignissen als auch bei längerfristigen Projekten auf eine fundierte Expertise gestützt werden. Auch in der Zusammenarbeit des Bundes mit den Ländern spielt diese Kompetenz eine wichtige Rolle.

Im Folgenden sollen einige Beispiele für agrarmeteorologische Politikberatung näher vorgestellt werden. Zunächst werden die Rahmenbedingungen der Landwirtschaft skizziert, um die Fülle der Faktoren aufzuzeigen, die die Landwirtschaft beeinflussen.

### Exkurs: Rahmenbedingungen der Landwirtschaft

Die Landwirtschaft ist einer Vielzahl an Faktoren ausgesetzt, die Einfluss auf Wachstum und Erträge nehmen und sich somit auch auf das landwirtschaftliche Einkommen auswirken. Seit jeher beeinflussen die Witterung, das Auftreten von Krankheiten und Seuchen in der Tier- und Pflanzenproduktion sowie außergewöhnliche Naturereignisse (z. B. Hagel, Starkwind, Sturm, Starkregen, Hochwasser, Dürre) die Landbewirtschaftung. Hierzu gehören auch Veränderungen der politischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen sowie Preisschwankungen. Die Preissteigerungsrate für Lebensmittel beispielsweise war im Vergleich zu anderen Wirtschaftszweigen sehr gering, was die Gewinnmargen der Landwirte verringert und zu immer mehr Rationalisierung und Produktionsoptimierung geführt hat. Solch ein System ist besonders anfällig für extreme Witterungsbedingungen. Darüber hinaus muss sich der landwirtschaftliche Unternehmer auf Haftungsrisiken, z. B. der Produkt- und Umwelthaftung, sowie persönliche Risiken, z. B. Krankheiten, Unfälle oder Todesfälle, einstellen.

Die Bewertung von produktions- und marktbedingten Risiken zählt zu den wichtigsten Aufgaben des Landwirts, und zwar auf der Grundlage umfassender Kenntnisse der bewirtschafteten Böden, der Produktionstechnik und Märkte. Neben der Bildung von Rücklagen, z. B. bei stark zyklischen Produktionsprozessen wie der Schweinehaltung, kann auch der Abschluss entsprechender Versicherungen oder die Ausgestaltung der vertraglichen Bindungen zwischen den einzelnen Stufen der Wertschöpfungskette zur Absicherung eingesetzt werden. Zunehmend gewinnt auch die Risikoabsicherung über die Finanzmärkte, z. B. über die Warenterminbörsen, an Bedeutung. Diese Möglichkeiten der Anpassung sind Bestandteil einer am Markt orientierten landwirtschaftlichen Produktion.

Der Staat ist gefordert, hierfür durch die Festsetzung und Sicherstellung der erforderlichen Rahmenbedingungen die Voraussetzungen für funktionsfähige Märkte zu schaffen, z. B. im Zusammenhang mit der Finanzmarktregulierung.

Darüber hinaus steht auch der Staat in besonderen Situationen und vor allem in Krisen in der Verantwortung, Einzelbetriebe zu unterstützen. So gibt es in Deutschland z. B. Tierseuchenkassen. Mit den Direktzahlungen, den Marktmaßnahmen und im Falle von außergewöhnlichen Marktkrisen den speziellen Krisenmaßnahmen bietet die 1. Säule der gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) ein gewisses Sicherheitsnetz. Für besondere Situationen gibt es zudem die Möglichkeit für staatliche Ad-hoc Hilfen (siehe Kap. 8.3.1). Eine darüber hinausgehende Absicherung wird nicht als Aufgabe des Staates angesehen. Risikomanagement gewinnt daher für die landwirtschaftlichen Unternehmen an Bedeutung.

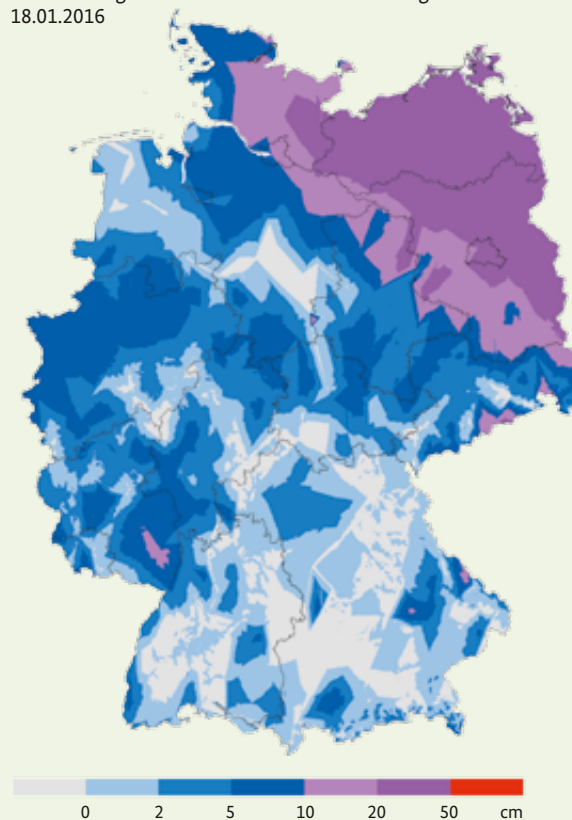
## 8.1 Entscheidungsgrundlagen und Mithilfe bei gesetzlichen Regelwerken

Ein klassisches Beispiel für agrarmeteorologische Politikberatung sind Voruntersuchungen zu gesetzlichen Regelwerken. Hierbei wird beispielsweise ermittelt und abgeschätzt, welche Konsequenzen Gesetzesänderungen, wie z. B. die Einführung neuer Grenzwerte, auf den Landwirt haben könnten. Zu diesem Zwecke werden geeignete agrarmeteorologische Datenreihen bezüglich der Häufigkeit der Grenzwertüberschreitungen analysiert.

Bei der fachlichen Zuarbeit zur Düngeverordnung geht es zum Beispiel um unterschiedliche Umweltaspekte und somit die Unterstützung für eine nachhaltige Landwirtschaft. (vgl. Kap. 3.1)

Eine Düngung ist nicht zulässig, wenn der Boden wassergesättigt, schneebedeckt oder gefroren ist. Präzisierungen und Abweichungen von dieser Regel können der Düngeverordnung (26. Mai 2017, S. 6 – 9) entnommen werden. Daneben gibt es je nach Kultur und Art der Düngemittel Zeiträume, in denen generell nicht gedüngt werden darf. Angaben zum Bodenfrost auf den Internetseiten des DWD können dem Landwirt als Entscheidungsgrundlage dienen, ob Düngemit-

Frosteindringtiefe unbewachsener Boden mittags  
18.01.2016



Deutscher Wetterdienst (erstellt 17.10.2016 11:40 UTC)  
Geobasisdaten © Bundesamt für Kartographie und Geodäsie ([www.bkg.bund.de](http://www.bkg.bund.de))

Abb. 8.1.1: Beispiel für die Frosteindringtiefe (in cm) am 18. Januar 2016



Tab. 8.1.1: Frosteindringtiefe und Auftauschicht (in cm) an Stationen in Berlin für einen mit Zwischenfrucht bewachsenen und unbewachsenen Boden - dargestellt für den Zeitraum 18. bis 22. Januar 2016.

Stationsname Nord-Süd-Sortierung	Bewuchs	Mo 18.01.	Di 19.01.	Mi 20.01.	Do 21.01.	Fr 22.01.
Berlin-Buch	unbewachsen	- / 26	- / 25	- / 23	- / 23	- / 26
	bewachsen	- / 4	- / 3	- / 2	- / 2	- / 5
Berlin-Tegel	unbewachsen	- / 20	1 / 20	1 / 22	- / 24	- / 27
	bewachsen	- / 2	- / 6	- / 7	- / 9	- / 12
Berlin-Marzahn	unbewachsen	- / 26	- / 25	- / 20	- / 20	- / 23
	bewachsen	1 / 1	- / 2	- / 2	- / 3	- / 5
Berlin-Tempelhof	unbewachsen	- / 20	1 / 19	- / 18	- / 17	- / 17
	bewachsen	- / 7	- / 4	- / 3	- / 2	- / 4
Berlin-Dahlem (FU)	unbewachsen	- / 25	- / 21	- / 20	- / 19	- / 18
	bewachsen	- / 2	- / 3	- / 3	- / 3	- / 5
Berlin-Kaniswall	unbewachsen	- / 27	- / 26	- / 21	- / 21	- / 23
	bewachsen	- / 8	- / 7	- / 7	- / 7	- / 9

tel ausgebracht werden können. In einigen Bundesländern, wie beispielsweise NRW, wird den Landwirten empfohlen, dieses Angebot zu nutzen und die jeweiligen Prognosen zu archivieren, falls es im Nachhinein zu Anzeigen kommen sollte. Ein Beispiel für die im Internet für den aktuellen Tag und die folgenden vier Tage zur Verfügung stehenden Informationen zeigen Abbildung 8.1.1 und Tabelle 8.1.1.

Ein weiteres Beispiel sind die agrarmeteorologischen Informationen, die als Zuarbeit zum Regelwerk für „benachteiligte Gebiete“ benötigt werden. Im Rahmen der Europäischen Förderung für benachteiligte landwirtschaftliche Flächen wurde ein einheitliches Regelwerk an Kriterien von Seiten der EU formuliert, welches für alle EU-Länder gilt und genau festlegt, ab wann ein Gebiet benachteiligt ist und somit Fördermittel erhalten kann. Hier wurden insgesamt acht Kriterien definiert, wovon sich drei direkt auf klimatische Bedingungen beziehen. Danach gelten beispielsweise Gebiete als benachteiligt, bei denen die Temperaturen während der Vegetationsperiode gering sind (Temperatursumme < 1500 Gradtage) oder die Wahrscheinlichkeit für diese eingeschränkten Bedingungen in mindestens 20 % der Jahre auftritt (Abb. 8.1.2).

Ähnliche Untersuchungen wurden für die Bodenwasserbilanz (zu trocken, zu feucht) und das für Deutschland wenig relevante Kriterium Hitzestress durchgeführt. Diese Auswertungen wurden den Bundesländern zur Verfügung gestellt, die alle Kriterien in einer Gesamtanalyse zusammenführten und letztendlich die benachteiligten Gebiete ausweisen konnten.

Wahrscheinlichkeit für eine Temperatursumme unter 1500 °C

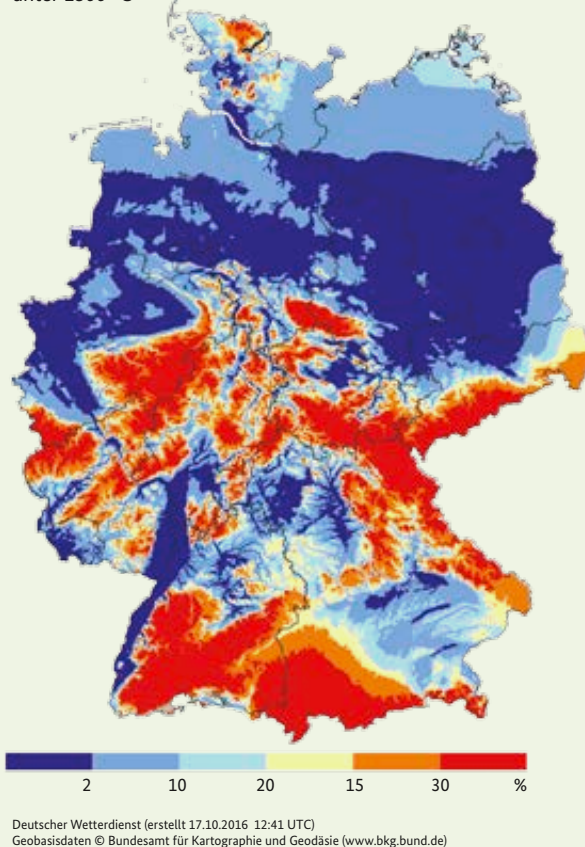


Abb.8.1.2: Wahrscheinlichkeit für die Unterschreitung einer Temperatursumme von 1500 Gradtagen während der Vegetationsperiode.

## 8.2 KlimaAtlas

Eine weitere Informationsgrundlage für Entscheidungsträger aus der Politik und die Öffentlichkeit bietet der Deutsche KlimaAtlas. Er gibt einen umfangreichen Überblick über die Entwicklung verschiedener meteorologischer und agrarmeteorologischer Größen in Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft. Für eine bessere Übersichtlichkeit sind diese Größen in den Sektoren Allgemein, Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Bodenschutz, Energiewirtschaft und Verkehr der deutschen Anpassungsstrategie (DAS) zusammengefasst (siehe Kap. 8.5). Karten verdeutlichen die regionalen Unterschiede. Sie liegen meist ab dem Jahr 2000 vor. Der zeitliche Verlauf des Deutschlandmittels gibt einen Hinweis auf einen möglichen Trend. Die berechneten Deutschlandmittel beginnen für die agrarmeteorologischen Parameter im Jahr 1961. Für einzelne meteorologische Größen liegen die Werte bereits ab 1951 (Ereignistage) bzw. 1881 (Temperatur und Niederschlag) vor. Je nach Parameter können die Zeiträume Monat, Jahreszeit und/oder Kalenderjahr ausgewählt werden. Ein Vergleich mit den langjährigen Mittelwerten (1961-1990) verdeutlicht die aktuelle Abweichung.

Abbildung 8.2.1 zeigt den KlimaAtlas am Beispiel des Vegetationsbeginns. Dieser wurde mit Hilfe einer Temperatursumme (Janssen, 2009), die an phänologische Beobachtungen angepasst wurde, berechnet. Als Eingangsgrößen dienen neben den gemessenen Klimadaten auch die Daten der Klimaprojektionen. Durch diese Auswertungen kann auch die zukünftige Entwicklung der einzelnen Parameter abgeschätzt werden. Die Ergebnisse des Ensembles von Klimaprojektionen werden als Karten des 15., 50. und 85. Perzentil (vgl. Abb. 8.2.1 rechts) und als Deutschlandmittel (vgl. Abb. 8.2.2) dargestellt.

Die Karten zu den Klimaszenarien zeigen für das ausgewählte Emissionsszenario die Änderungen der mittleren Verhältnisse für zukünftige 30-jährige Zeiträume im Vergleich zur aktuellen klimatologischen Referenzperiode 1961-1990, wobei die 30-jährigen Zeiträume für die Jahre von 2010-2100 im Abstand von 10 Jahren (also 2010-2040, 2020-2050 usw.) ausgewählt werden können. Bis zum Ende dieses Jahrhunderts ist mit einer Verfrühung des Vegetationsbeginns um 2 bis 3 Wochen im Vergleich zum Zeitraum 1961-1990 zu rechnen.

**Abb. 8.2.1: Berechneter Eintrittstermin des Vegetationsbeginns als Jahrestag; links: Karte für den Zeitraum 1961-1990, Mitte: Karte für das Jahr 2017, rechts: Perzentil-Darstellung der Änderungstendenz in Tagen für den Zeitraum 2070-2100 im Vergleich zu 1961-1990; negative Werte (rot) entsprechen einer Verfrühung des Vegetationsbeginns (Deutscher KlimaAtlas 2017).**

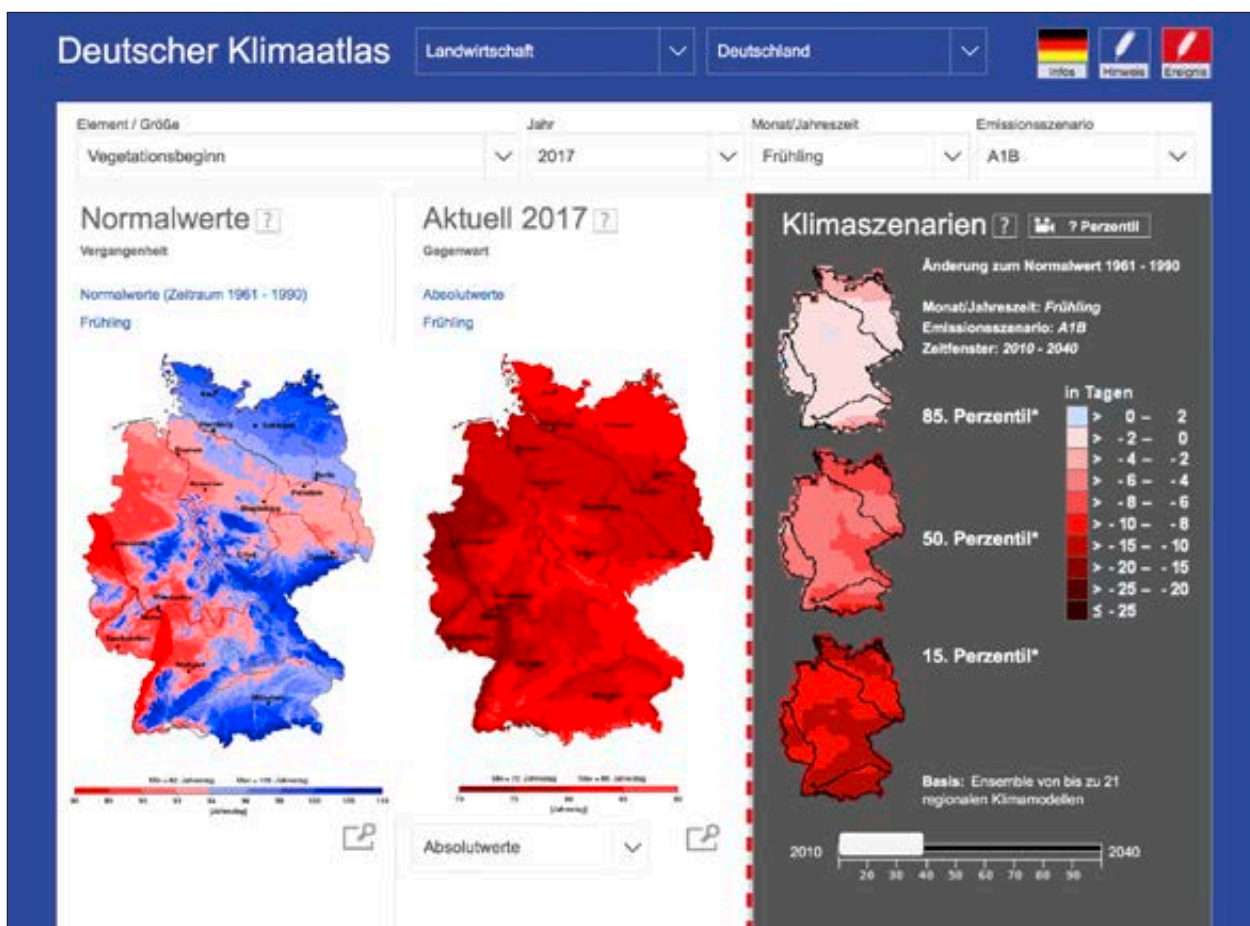
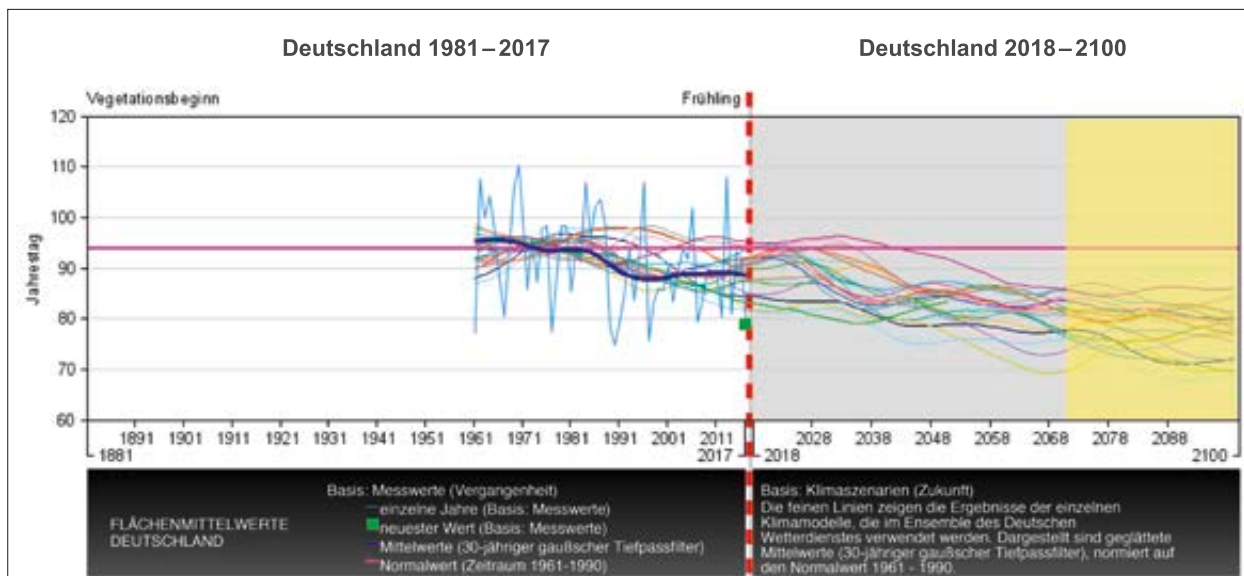


Abb. 8.2.2: Verlauf des berechneten Vegetationsbeginns 1961 bis 2100 im Deutschlandmittel, der gelb hinterlegte Bereich markiert den in Abb. 8.2.1 ausgewählten Zeitraum der Klimaprojektionen (Deutscher Klimaatlas 2017).



#### Perzentil – Beschreibung

Perzentile sind statistische Lage-Maße zur Charakterisierung größerer Datenmengen. Mit ihnen wird der Wertebereich der Daten beschrieben.

Sie symbolisieren Schwellenwerte, unter denen ein bestimmter Prozentsatz der Daten liegt. Im Klimaatlas werden das 15., 50. und 85. Perzentil verwendet. Im Bereich zwischen dem 15. und 85. Perzentil liegen 70 % der Modellergebnisse.

### 8.3 Extreme Witterungssituationen in der Landwirtschaft

#### 8.3.1 Ad-hoc-Hilfen

Zur agrarmeteorologischen Politikberatung gehören auch die Bewertung extremer Witterungssituationen und deren Auswirkungen auf die Landwirtschaft, denn hier besteht die Möglichkeit für staatliche Ad-hoc-Hilfen. Beim Eintreten besonderer meteorologischer Ereignisse behält sich die Politik vor, Sonderleistungen an Städte oder Gemeinden, aber auch an die Landwirtschaft zu zahlen. Bei der Bewertung, ob ein Ereignis extrem war, wird die Expertise des DWD eingeholt. Hier sind insbesondere die Agrarklimastatistiken von Interesse, anhand derer quantifiziert werden kann, ob und wie häufig in der Vergangenheit vergleichbare Situationen aufgetreten sind und welche Gebiete hiervon betroffen waren.

Im Februar 2009 wurde durch die Generaldirektion der Europäischen Kommission genehmigt, dass die EU-Länder bei Naturkatastrophen staatliche Beihilfe leisten können. Bei nachweisbaren Schäden für die Landwirtschaft überprüft

der DWD das Vorliegen einer extremen Witterungssituation – zum Beispiel einer Dürre –, die dem Bund oder den Ländern im Falle einer Bestätigung ermöglicht, Ausgleichszahlungen vorzunehmen.

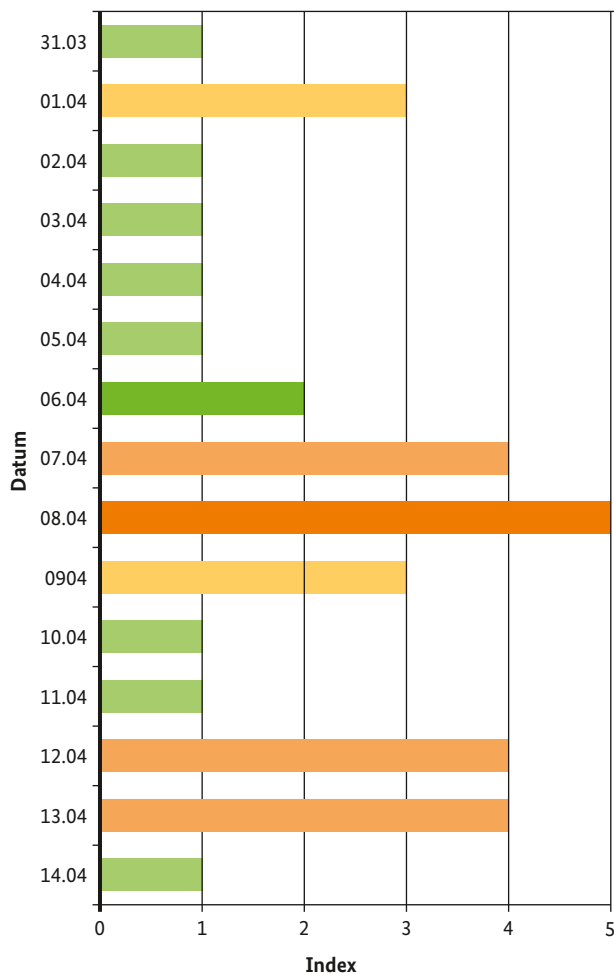
#### 8.3.2 Erosion durch Wind

Der DWD wird auch bei Ereignissen anderer Art um fachliche Bewertung gebeten. So führte ein Sandsturm im Frühjahr 2011 zu einem Massenunfall auf der Bundesautobahn 19 nahe Rostock. Die Ursache für die Emission der verantwortlichen Staubwolke wird in einer vorausgegangen tiefgehenden Bodenbearbeitung auf einem Feld neben der Autobahn gesehen. Dieser Vorfall war mitausschlaggebend dafür, das Thema Winderosion näher zu erforschen und einen Gefährdungsindex zu entwickeln.

Als begünstigend für den Winderosionsprozess wirkt sich – neben starkem Wind – eine gleichzeitig vorliegende niedrige Krümmenfeuchte des Bodens bei wenig oder unbedecktem Boden aus. Diese Bedingungen sind im Zusammenhang mit einer zunehmenden Frühjahrstrockenheit im Rahmen des Klimawandels oftmals gegeben. Ist eine bestimmte Schwelle der Windgeschwindigkeit überschritten, beginnt zunächst ein Kriechen der leichten Bestandteile des Bodens an der Oberfläche. Im weiteren Verlauf werden durch Kollisionsprozesse kleinere Partikel des Bodens aus ihren Gefügen gelöst und in größere Höhen aufgewirbelt.

Eine landwirtschaftliche Kultur vermag den erosionsbedingten Abtrag vor allem ab dem Stadium des Bestandsschlusses deutlich zu vermindern. Soll während des Frühjahres bei Trockenheit eine Aussaat stattfinden, so empfiehlt sich, diese als Direkt- oder Mulchsaat vorzunehmen. Dies setzt eine vorsorglich gezielte Begrünung der Ackerflächen nach der

Abb. 8.3.1: Gefährdungsindex für Winderosion, für Rostock 31.03.-14.04.2011



Ernte der Hauptfrucht des vergangenen Jahres voraus. In Ackerkulturen, die aufgrund des späten herbstlichen Erntetermins die Aussaat von Zwischenfrüchten aufgrund zu geringer Temperaturen und sich verkürzender Tageslängen nicht zulassen (z. B. Mais), besteht die Möglichkeit, bereits während der Hauptwachstumszeit Untersaaten zwischen den Reihen auszusäen. Eine an Bodentyp und Bodenart angepasste ausreichende Kalkversorgung sichert nachhaltig ein krümelstabiles Bodengefüge und die Wasseraufnahmefähigkeit. Auf diese Weise kann das großflächige Freiliegen von erodierbarem Material, das bei der ganzflächigen Saatbettbereitung entsteht, vermieden werden.

Um die Gefährdung durch Winderosion zu quantifizieren, wurde im DWD ein Modell entwickelt, das die relevanten meteorologischen Eingangsgrößen Wind und Krümmenfeuchte einbezieht und einen Index von 1 bis 5 ausgibt. Der Zeitraum um den oben genannten Erosionsfall nahe der A19 soll in Abbildung 8.3.1 als Fallstudie für eine mögliche Modellausgabe dienen. Als Ergebnis dieser Untersuchung werden die Vorhersagen der Warnindizes den Behörden (Landwirtschaftskammern, Ämter für Landwirtschaft in den Ländern) sowie Forschungseinrichtungen im Falle eines zu erwartenden Ereignisses per E-Mail zur Verfügung gestellt.

## 8.4 Forschungsprojekte zur Klimafolgenabschätzung

Die Zunahme extremer Witterungssituationen wird oft mit dem Klimawandel in Verbindung gebracht. Um die Auswirkungen auf die Landwirtschaft abschätzen zu können, werden verschiedene Forschungsprojekte und Studien zu dieser Thematik durchgeführt. Deren Ergebnisse dienen der Politik als Entscheidungsgrundlage für die Erarbeitung von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel.

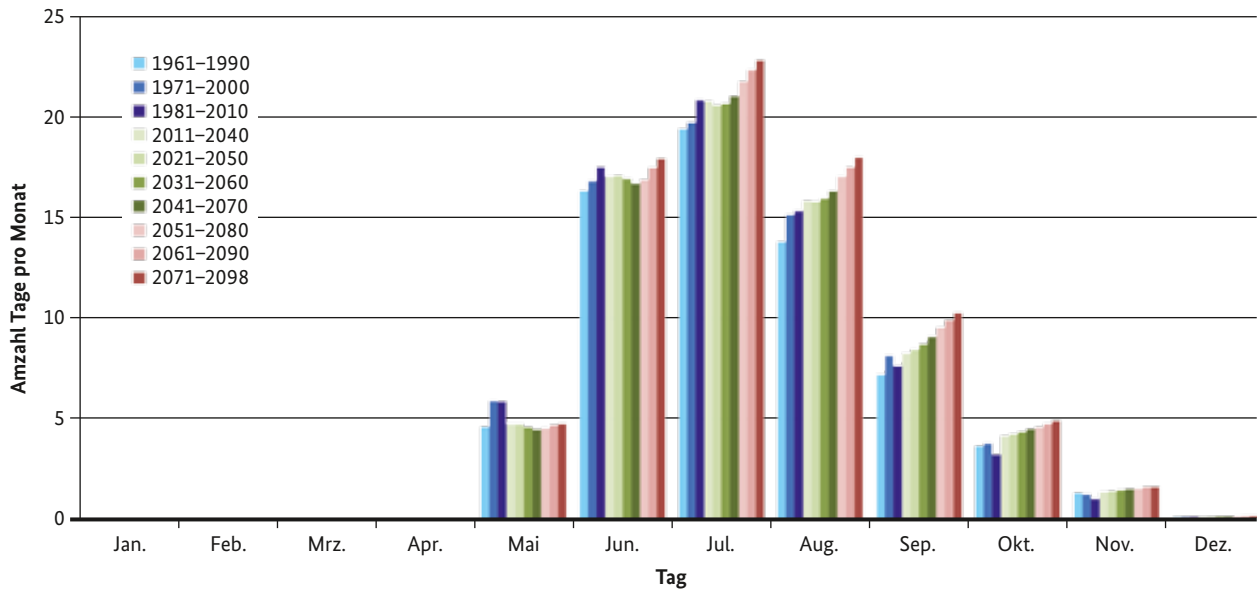
### 8.4.1 Verbundforschungsprojekt „Agrarrelevante Extremwetterlagen und Möglichkeiten von Risikomanagementsystemen“

Die langfristigen Auswirkungen des Klimawandels sind relativ gut erforscht. Bezüglich der durch den Klimawandel bedingten und von vielen Experten erwarteten Zunahme von Extremwetterlagen liegen dagegen kaum belastbare Erkenntnisse vor, erst recht nicht regional und differenziert nach Kulturarten.

Unter Federführung des Thünen-Instituts zusammen mit dem JKI, dem DWD und weiteren Partnern wurde im Auftrag des BMEL eine Studie zu „Agrarrelevante Extremwetterlagen und Möglichkeiten von Risikomanagementsystemen“ durchgeführt. Im Mittelpunkt der Untersuchungen standen die regionalen Auswirkungen von Extremwetterlagen auf die



Abb. 8.4.1: Anzahl der Tage mit Bodenfeuchten < 50 % nFK (Wintergetreide, leichter Boden) pro Monat, Deutschlandmittel für 30-jährige Zeiträume in Vergangenheit und Zukunft (Gömann et al., 2015)



deutsche Land- und Forstwirtschaft. Die Fragen, ob, welche und wo Extremwetterlagen zunehmen, was die Auswirkungen auf die land- und forstwirtschaftliche Produktion sind und wie Wirtschaft oder Staat darauf reagieren können, waren zu beantworten.

Durch Extremwetterlagen wie Dürre, Hagel, Stark- und Dauerregen, extreme Fröste und Stürme können in der Land- und Forstwirtschaft binnen Stunden, Tagen oder Wochen extreme Schäden auftreten (Gömann et al., 2015). Für eine Vielzahl landwirtschaftlicher Kulturen und Sonderkulturen wurden extreme Wetterbedingungen und die dazugehörigen Zeiträume, die potenziell zu Ertragsverlusten führen können,

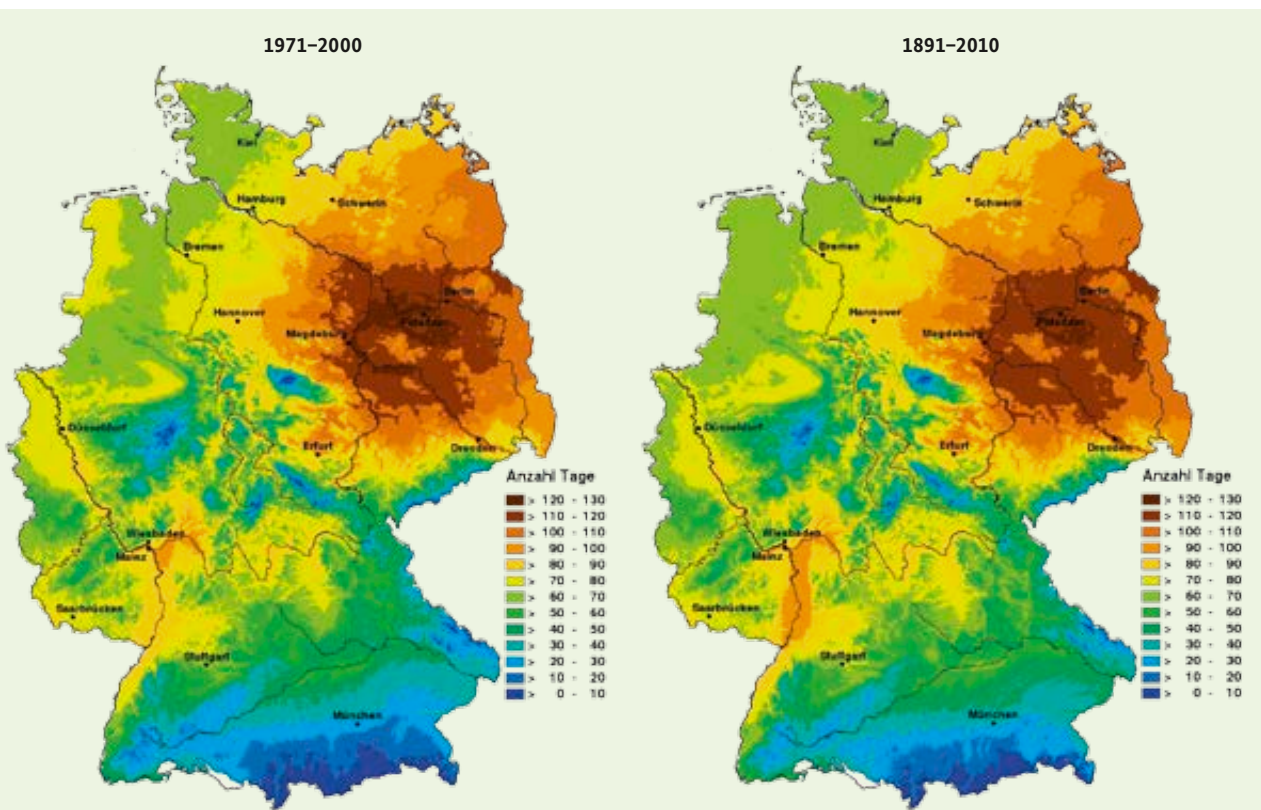


Abb. 8.4.2: Regionales Auftreten und Entwicklung der Anzahl der Tage mit Bodenfeuchten < 50 % nFK (Wintergetreide, leichter Boden) im Zeitraum April bis Oktober, 30-jährige Mittelwerte 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010 (Gömann et al., 2015)

definiert. Ausgehend von den so festgelegten Schwellenwerten erfolgte die Auswertung der Klimadaten (1961-2010) und der Klimaprojektionen (2011-2100). Hierfür wurde das Softwarepaket AMBER (AgrarMeteorologische BERatung) des DWD verwendet, das seit Jahren für die Beratung von Landwirten eingesetzt wird.

Das Teilmodell AMBAV (siehe Kapitel 4.3) berechnet den Wasserbedarf unterschiedlicher landwirtschaftlicher Kulturen und wird in der Berechnungsberatung des DWD eingesetzt. Um z. B. die Gefahr für Trockenheit abschätzen zu können, wurde die Anzahl an Tagen bestimmt, an denen die Bodenfeuchte den Wert von 50 % nutzbarer Feldkapazität (% nFK, siehe auch Kapitel 3.2) unterschreitet.

Abbildung 8.4.1 zeigt für Wintergetreide auf einem leichten Boden die Anzahl an Tagen pro Monat, an denen die Bedingung erfüllt wird. Anhand von Berechnungen mit den Klimaprojektionsdaten ergibt sich zukünftig für viele Monate eine deutliche Zunahme der Anzahl der Tage mit geringer Bodenfeuchte. Abbildung 8.4.2 zeigt indirekt die regional sehr unterschiedliche Niederschlagsverteilung in Deutschland. Die geringeren Niederschlagsmengen, vor allem im Osten, führen zu einer geringeren Bodenfeuchte. Im Zeitraum von April bis Oktober wird hier an 80 bis 120 Tagen (1961-1990) der Grenzwert von 50 % nFK unterschritten. Diese Situation hat sich bis 2010 bereits sichtbar verschärft. Mit dem Klimawandel steigen die Temperaturen und das führt zu einer steigenden Verdunstung bei den Pflanzen, so dass dem Boden mehr Wasser entzogen wird.

Insgesamt zeigen die Projektergebnisse für die untersuchten Parameter Hitze, Dürre, Trockenheit sowie Dauerregen und Starkregen tendenziell eine Zunahme, wohingegen die Gefahr von Winterfrost, Wechselfrost und Nässe tendenziell abnimmt. Ackerkulturen, Sonderkulturen und Wälder sind davon in unterschiedlichem Maße betroffen.

Die Ergebnisse von Gömann et al. (2015) unterstützen die Land-, Forst- und Versicherungswirtschaft dabei, sich frühzeitig auf die zu erwartenden Veränderungen einzustellen und über geeignete Anpassungsmaßnahmen nachzudenken. Agrarpolitisch wird kein unmittelbarer Handlungsbedarf gesehen. Die bestehenden Instrumente zur Krisenbewältigung reichen grundsätzlich aus. Auf längere Sicht ist ggf. über eine Neubewertung der verschiedenen Instrumente (Ad-hoc-Hilfen, Versicherungen) nachzudenken. Staatliches Handeln auf den Märkten für Risikomanagementinstrumente muss gut begründet sein. Grundsätzlich besteht eine erhebliche Gefahr, betriebliche Anpassungsmaßnahmen sowie privatwirtschaftliches Risikomanagement zurückzudrängen und potenziell unerwünschte risikoreiche Anbausysteme zu fördern. Prioritäre Aufgabe des Staates sollte es sein, die Informationslage und -verbreitung zur Relevanz und zukünftigen Entwicklung agrarrelevanter Extremwetterlagen sowie zu den Möglichkeiten und Kosten von betrieblichen Anpassungsmöglichkeiten weiter zu verbessern, so das Fazit der Studie. Seidel (2016) hat die weltweit seit 1910 verfügbaren Informationen zum Einfluss der Extremwetterereignisse

für die oben genannten Parameter sowie Überflutungen, Strahlung und Nassschnee am Beispiel der Schaderreger in Weizen, Gerste und Mais zusammengefasst und verweist auf die Notwendigkeit weiterer Forschungsarbeiten auch vor dem Hintergrund widersprüchlicher Aussagen.

#### 8.4.2 Weitere Forschungsprojekte

Für die Verbesserung des Bewässerungsmanagements und der damit verbundenen Reduzierung des Wasserbedarfs bei der Feldberechnung wurde für verschiedene Versuchsanstellungen eine Berechnungsberatung mit dem Modell AMBAV des DWDs durchgeführt. Im Rahmen von verschiedenen Forschungsprojekten (Aquarius, KLIMZUG) erfolgte für die Berechnungssteuerung ein täglicher Austausch der Klimadaten. Durch die Abschätzung von Berechnungsbedürftigkeit und Berechnungswürdigkeit auf Basis von Klimadaten wurde in verschiedenen Projekten (z. B. LandCare, ErbNRW) die Rentabilität der Bewässerung in Deutschland analysiert.

Im Rahmen von Free Air Carbon Dioxide Enrichment (FACE)-Versuchen untersucht das Thünen-Institut die Auswirkungen steigender atmosphärischer CO<sub>2</sub>-Konzentrationen auf Kulturpflanzen und wird dabei vom DWD mit meteorologischen Messungen zur Erfassung des Mikroklimas, der Bodenfeuchte und der Verdunstung der Bestände unterstützt.

Im Rahmen des SOILAssist-Vorhabens untersucht ein transdisziplinärer Projektverbund mithilfe von DWD-Daten sowie mittels Sensortechnik die Optimierungsmöglichkeiten für die Befahrbarkeit des Bodens bei unterschiedlichen Bodenfeuchtegraden (bodenschonende Verfahren). Hierbei werden auch die Akzeptanz und Implementierung von Assistenzsystemen für die Fahrerkabine in einem umfassenden Kommunikationsteil ermittelt.

An der Hochschule Geisenheim University werden vor dem Hintergrund des Klimawandels veränderte wein- und gartenbauliche Produktionsbedingungen identifiziert, mögliche Auswirkungen in den verschiedenen Sparten des Wein- und Gartenbaus dargelegt und Vermeidungs- oder Anpassungsstrategien erarbeitet. Auch in diesem Zusammenhang sind agrarmeteorologische Modelle notwendig. Auf der Basis solcher Modelle können z. B. zukünftige Klimaszenarien visualisiert, das Verschwinden oder die Zunahme verschiedener landwirtschaftlicher Ressourcen verdeutlicht und nicht zuletzt die Erhöhung oder Verringerung der Schadenswahrscheinlichkeit durch bestimmte Schaderreger abgeschätzt werden.

Der Politik müssen kurz-, mittel- und langfristige Veränderungen in den drei genannten Sektoren Klima, Ressourcen und Schaderreger bekannt sein, um politische Entscheidungen und Ausrichtungen entsprechend anpassen zu können. Einige dieser Fragestellungen werden in Geisenheim im Rahmen der FACE-Projekte für Reben bzw. Gemüse untersucht.

Folgende Forschungsbereiche sind hier beispielhaft zu nennen:

- Vorhersage der Erhöhung oder Verringerung der Schadenswahrscheinlichkeit durch das Auftreten des Falschen Mehltaus im Weinbau unter erhöhten CO<sub>2</sub>-Bedingungen und des potenziell daraus erwachsenden wirtschaftlichen Schadens für die Weinwirtschaft durch einen möglichen Anstieg des Fungizideinsatzes.
- Nutzung von Bestandsklimamodellen für landwirtschaftliche Grenzstandorte, insbesondere bezogen auf die Ressource Wasser (z. B. Abschätzung der zukünftigen Anbauwürdigkeit von Steillagen im Weinbau oder von Bewässerungsstrategien im Gemüsebau).
- Abschätzung der langfristigen Temperaturveränderung in verschiedenen Anbauregionen in Deutschland mittels Klimamodellen zur Prognose der Anbauwürdigkeit verschiedener landwirtschaftlicher Kulturen (z. B. Mais als Energiepflanze vs. Weizen für Brotgetreide oder regional produziertes Gemüse).
- Mögliche Verschiebungen des Sortenspektrums bei Dauerkulturen wie Obst, Wälder oder Reben, deren Anbau langfristig geplant werden muss.
- In diesem Kontext ist auch die notwendige gesellschaftspolitische Diskussion im Zusammenhang mit der Einführung veränderter Produktionsbedingungen bzw. neuer Sorten im Falle einer fehlenden Verbraucherakzeptanz zu sehen.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass Datengrundlagen in der Forschung und für die Politikberatung weiter eine sehr wichtige Rolle spielen. So werden die Folgen von klimatischen Veränderungen landwirtschaftliche Erträge und die Landnutzung beeinflussen und damit ökonomische, ökologische und gesellschaftliche Änderungen oder Anpassungen von Managementsystemen hervorrufen oder die sich in Politikanpassungen widerspiegeln.

Ein effizientes und nachhaltiges Wassermanagement, eine nachhaltige und schonende Bodenbearbeitung, Assistenz-, Frühwarn- und Informationssysteme spielen eine entscheidende Rolle für eine wettbewerbsfähige und nachhaltige Landwirtschaft. Hier besteht weiterhin und verstärkt Forschungsbedarf, um den zukünftigen Herausforderungen zu begegnen.

Dabei ist es wichtig, die Auswirkungen des Klimawandels auf die landwirtschaftliche Landnutzung, landwirtschaftliche Erträge und Einkommen besser abzuschätzen. Darauf aufbauend lassen sich unter anderem die ökonomischen Auswirkungen von Extremwetterereignissen besser quantifizieren. Hierfür sind fundierte und aktuelle Daten zu Temperatur, Niederschlag, potenzieller Verdunstung, Globalstrahlung, Bodenfeuchte, etc. unabdingbar.

Eine Bodenbearbeitung beispielsweise, welche die aktuelle Bodenfeuchte (durch Multisensorsysteme und DWD-Daten) mit berücksichtigt, trägt wesentlich zur Vorsorge gegen Bodenerosion und Bodenverdichtung bei. Daher gewinnt die Bereitstellung von Echtzeit-Daten für die Optimierung der

Befahrbarkeit des Bodens, insbesondere in der Erntesaison (enge Bearbeitungszeitfenster), zunehmend an Bedeutung für die Landwirtschaft.

## 8.5 Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel

Mit der Deutschen Anpassungsstrategie (DAS), die am 17. Dezember 2008 vom Bundeskabinett beschlossen wurde, hatte die Bundesregierung sich erstmals zum Thema Anpassung an die Folgen des Klimawandels positioniert und die in den verschiedenen Ressorts begonnenen Arbeiten in einem gemeinsamen strategischen Rahmen gebündelt (Bundesregierung, 2008).

Die DAS legt den Grundstein für einen mittelfristigen Prozess, in dem schrittweise mit den Bundesländern und anderen gesellschaftlichen Gruppen die Risiken des Klimawandels bewertet, der mögliche Handlungsbedarf benannt, die entsprechenden Ziele definiert sowie mögliche Anpassungsmaßnahmen entwickelt und umgesetzt werden sollen. Die Strategie gliedert sich in 13 Handlungsfelder – darunter auch das Handlungsfeld Landwirtschaft (BMUB, 2008).

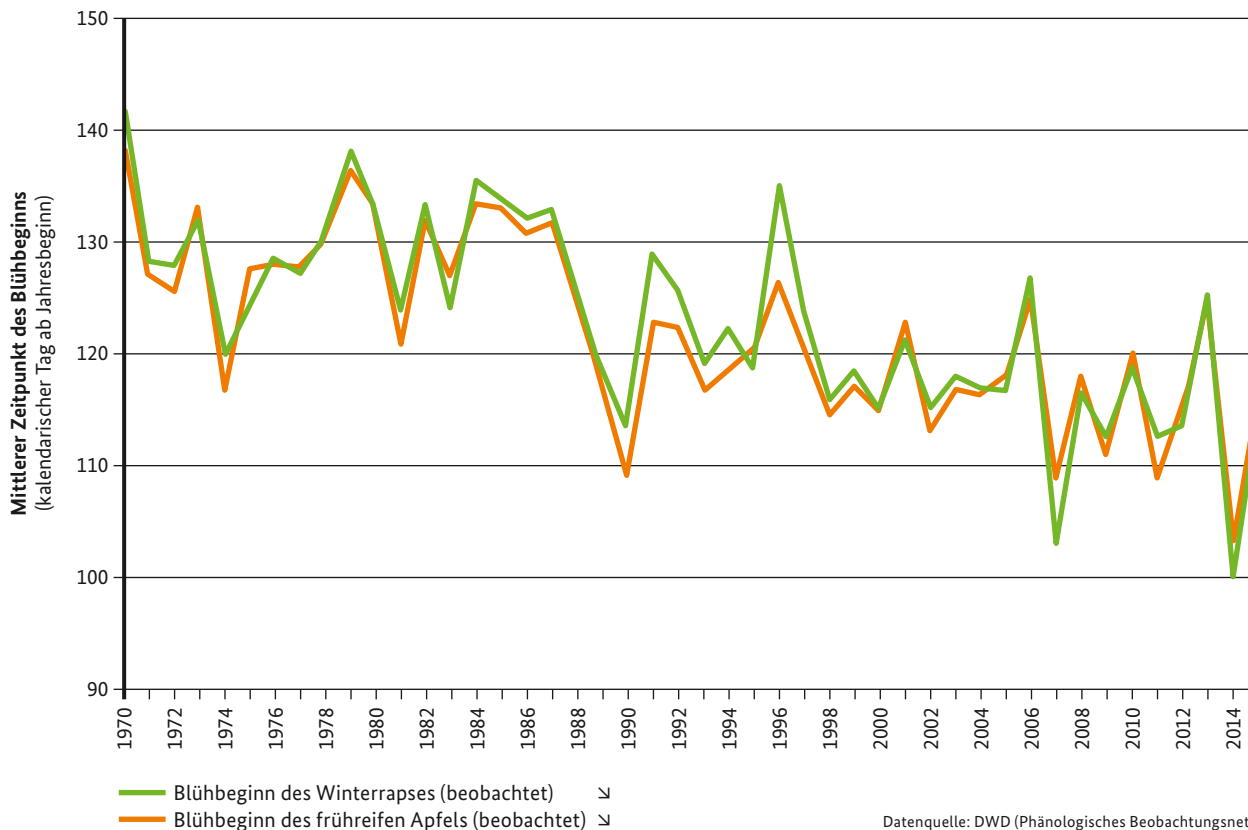
Für die DAS wurde ein Indikatorensystem entwickelt. An der Entwicklung von Indikatoren für das Handlungsfeld Landwirtschaft waren u. a. das Thünen-Institut, das Julius Kühn-Institut und der DWD beteiligt.

Die Indikatoren wurden stets in zwei Gruppen untergliedert: In die sogenannten Impact-Indikatoren, die die Auswirkungen des Klimawandels auf das Handlungsfeld zeigen sollen und in die Response-Indikatoren, die ergriffene Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel darstellen.

Ein Beispiel für einen Impact-Indikator im Handlungsfeld Landwirtschaft ist die Verschiebung agrarphänologischer Phasen, da die Pflanzenentwicklung ein guter Indikator für den Klimawandel ist. Ein Beispiel für einen Response-Indikator im Handlungsfeld Landwirtschaft ist die Anwendung von Pflanzenschutzmitteln, die auch in Zeiten des Klimawandels optimal an die Witterungsverhältnisse angepasst sein sollte, um die benötigten Mengen zu reduzieren. Auch im Handlungsfeld Boden wurden Indikatoren entwickelt, die agrarmeteorologischen Bezug haben (UBA, 2011).

Als Impact-Indikatoren für die Verschiebung agrarphänologischer Phasen dienen beispielsweise die Blühbeginne des Apfels und des Winterrapses (vgl. Kapitel 6.7). Trotz erheblicher interannueller Schwankungen der Phasen sind seit 1970 signifikante Trends zur Verfrühung erkennbar. Aktuell wird der Blühbeginn rund 20 Tage früher als in den 1970er Jahren beobachtet. Beim Apfel beispielsweise kann die frühe Blüte die Gefahr von Spätfrösten erhöhen. Vielerorts reagieren die Obstbauern darauf mit gezielten Frostschutzberechnungen (vgl. Kapitel 6.7) (UBA, 2015).

Abb. 8.5.1: Mittlerer beobachteter Zeitpunkt des Blühbeginns des Winterrapses und des frühreifenden Apfels (kalendrischer Tag ab Jahresbeginn) von 1970 bis 2015 in Deutschland. Abgeändert und aktualisiert nach Umweltbundesamt (Hrsg.) 2015.



## 8.6 Zusammenfassung

Das Kapitel hat verdeutlicht, welche Relevanz agrarmeteorologische Informationen für Entscheidungsträger aus der Politik haben. Drei Anwendungsgebiete sind dabei besonders hervorzuheben: Die Unterstützung beim Erstellen von Regularien und Gesetzen, die gerechte Verteilung von witterungsbedingten Ausgleichszahlungen und die Befähigung der Politik, Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel in die Wege zu leiten. Verlässliche und objektive agrarmeteorologische Informationen haben für Entscheidungsträger eine große Bedeutung. Hierbei sind neben dem Monitoring der aktuellen Situation auch Analysen zur künftigen klimatischen Entwicklung wichtig.

## Literatur

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) 2008: [www.bmub.bund.de/N42783/](http://www.bmub.bund.de/N42783/).

Düngeverordnung vom 26. Mai 2017 (BGBl. I S. 1305): [https://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/d\\_v\\_2017/gesamt.pdf](https://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/d_v_2017/gesamt.pdf) (S. 6-9).

Gömann H, Bender A, Bolte A, Dirksmeyer W, Englert H, Feil J-H, Frühauf C, Hauschild M, Krenkel S, Lilienthal H, Löpmeier F-J, Müller J, Mußhoff O, Natkhin M, Offermann F, Seidel P, Schmidt M, Seintsch B, Steidl J, Strohm K, Zimmer Y (2015): Agrarrelevante Extremwetterlagen und Möglichkeiten von Risikomanagementsystemen: Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL); Abschlussbericht: Stand 3.6.2015. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 312 p, Thünen Rep 30, doi:10.3220/REP1434012425000.

Janssen W. (2009): Definition des Vegetationsanfangs. Abteilung Agrarmeteorologie, unveröffentlichtes Manuskript des DWD.

Seidel P. (2016): Auswirkungen von Extremwetterereignissen auf Schaderreger, ihr Schadwirkung und Pflanzenschutzmaßnahmen – erste Hinweise. Journal für Kulturpflanzen 68 (9), 253-269. DOI (10.5073/JfK.2016.09.02).

Umweltbundesamt (UBA) 2011: Entwicklung eines Indikatorensystems für die Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS).

Umweltbundesamt (UBA) 2015: Monitoringbericht 2015 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel - Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung. 258 S., Dessau-Roßlau.





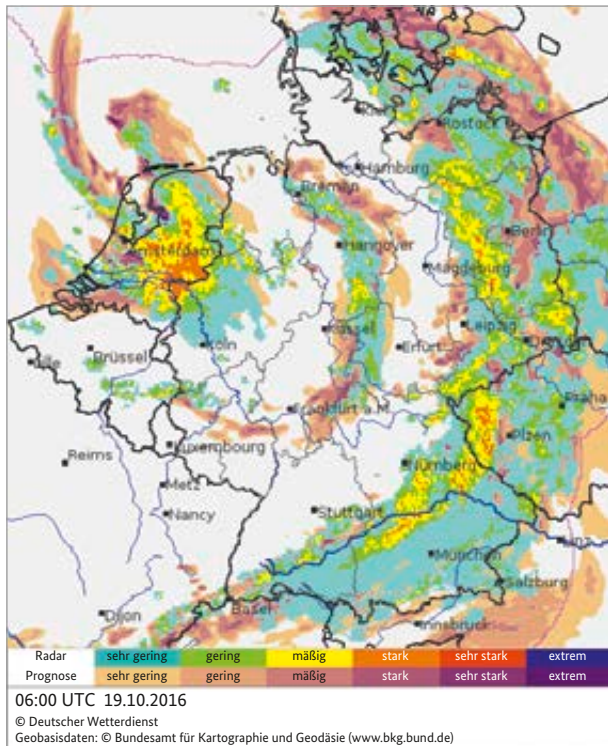
## 9 Ausblick

*Autoren: Udo Busch, Holger Lilienthal*

Die Landwirtschaft und mit ihr die Agrarmeteorologie unterliegt einem kontinuierlichen Wandel. Insbesondere seit das digitale Zeitalter Einzug gehalten hat, sind die Entwicklungssprünge deutlich schneller geworden. Steigende Produktivität unter Beachtung der guten fachlichen Praxis und aktueller Umweltauflagen bestimmen das Handeln der Akteure. Die Größe der Flächen, die von einzelnen Betrieben bewirtschaftet wird, nimmt zu und so sind die Landwirte für eine effiziente Bewirtschaftung auf den Einsatz von Farmmanagementsystemen angewiesen. Wie in den vorhergehenden Kapiteln bereits gezeigt wurde, benötigen diese Systeme agrarmeteorologische Informationen und Entscheidungshilfen. Für die schlaggenaue umweltschonende Ausbringung von z. B. Dünge- und Pflanzenschutzmitteln ist heute mehr denn je die Einbindung von agrarmeteorologischen Informationen und weiteren Datenquellen angezeigt.

Insbesondere in einer Landwirtschaft der Zukunft (Landwirtschaft 4.0) werden ganze Systeme wie z.B. Landmaschinen-, Farmmanagement- und Bewässerungssysteme miteinander verbunden und untereinander kommunizieren müssen. Vor Ort erhobene oder für den Ort möglichst genau abgeleitete Wetterdaten müssen mit agrarmeteorologischen Prognosen und Hinweisen verknüpft werden, damit intelligente Managementsysteme die Einbindung und Applikation dieser Daten in Form eines autonomen Produktionsprozesses ermöglichen. In Verbindung mit moderner hochgenauer Navigationsunterstützung aus dem All werden sich diese Informationen zukünftig schlaggenau in die Praxis umsetzen lassen.

**Abbildung 9.1: Mit einem Wetterradarverbund beobachteter Niederschlag und Prognose mithilfe eines Vorhersagemodells.**



Im Bereich der bodengebundenen Fernerkundung (Wetterradar) erleben wir gerade einen weiteren Fortschritt durch das immer ausgeklügeltere Zusammenspiel traditioneller Messtechnik zur Niederschlagsbestimmung (elektronisches Niederschlagsmessnetz) mit hochmoderner Wetterradartechnologie. Lieferten die ersten Wetterradarsysteme in den 1980er Jahren nur unpräzise Informationen über Intensität, Position und Bewegungsrichtung von Niederschlagssechos, so sind wir heute in der Lage, Niederschlagsgebiete auf 1000 m genau zu lokalisieren, deren Ergiebigkeit zu quantifizieren und Aussagen darüber zu treffen, ob es sich um Regen, Schnee oder Hagel handelt.

Mit Verwendung der bodengebundenen Niederschlagsmessnetze zur Eichung der Daten hochmoderner Wetterradar-netze wird die Qualität der Niederschlagsanalysen ständig verbessert. Die immer mehr auch auf zeitkritische Anwendungen ausgerichtete Nutzung hat dazu geführt, dass weitere neue Produkte entwickelt wurden und operationell zur Verfügung gestellt werden konnten. Beispielhaft sei an dieser Stelle die Radarprognose erwähnt, eine Kombination der aktuell gemessenen Informationen des Wetterradars mit einem Wetterprognosemodell zur hochgenauen Vorhersage des Niederschlags der nächsten zwei Stunden. Dies sind Informationen, die schon heute von immenser Bedeutung für die Landwirtschaft sind. Je präziser die Niederschläge räumlich und zeitlich erfasst und prognostiziert werden, desto höher ist der ökonomische und ökologische Wert dieser Informationen. An dieser Stelle sei aber auch erwähnt, dass neben dem Niederschlag weitere meteorologische Daten aus der Fernerkundung bereits Einzug in die Agrarmeteorologie gefunden haben. Exemplarisch seien hier die Strahlungsdaten (Globalstrahlung) erwähnt, die heute schon routinemäßig erfasst und operationell verwendet werden.

Ein wichtiger Baustein für die Landwirtschaft der Zukunft ist die boden- und satellitengebundene Fernerkundung. Mit dieser Technik lässt sich eine Vielzahl von notwendigen meteorologischen und pflanzenphysiologischen Informationen räumlich und zeitlich hoch aufgelöst für die Landwirtschaft ermitteln. Nur so ist es möglich, die künftigen Optimierungssysteme der Landwirtschaft mit hinreichenden Informationen (Big Data) zu versorgen.

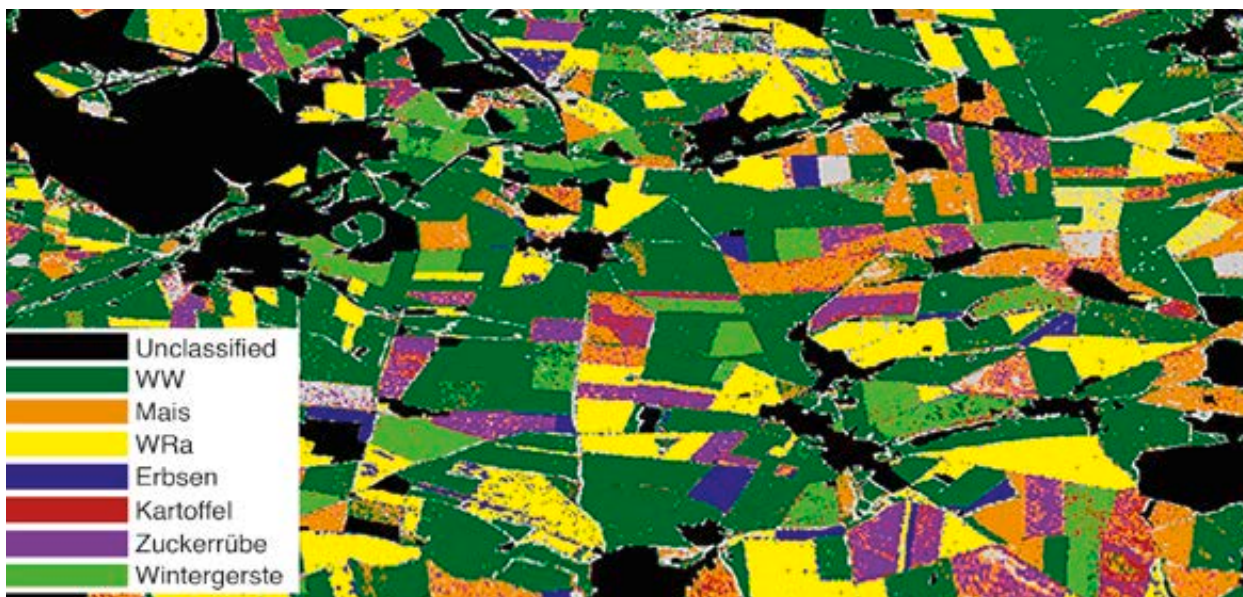
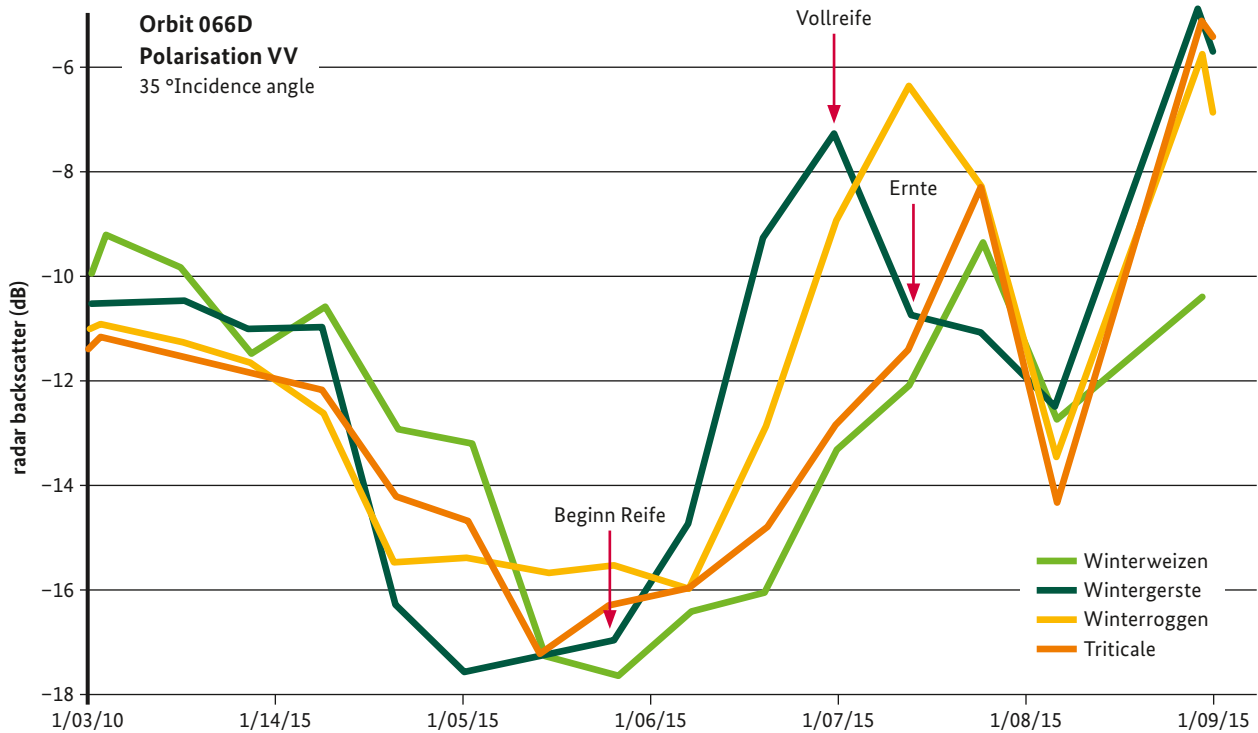


Abb. 9.2: Ergebnis einer automatischen Klassifikation der angebauten Kulturarten. Grundlage waren 14 Aufnahmen zwischen März und August 2015.

Abb. 9.3: Sentinel-1 Radarrückstreu-Signaturen für Getreide. Die Pfeile markieren phänologische Zeitpunkte für Wintergerste.



Die häufigen Wiederholraten und die relative Witterungs-unabhängigkeit der Sentinel-1 Satelliten erlauben ein kontinuierliches Monitoring landwirtschaftlicher Flächen. Eine wichtige Anwendung ist die Erfassung der realen Landbedeckung, da diese Information die Grundlage für eine Vielzahl von Modellen und Systemen darstellt.

Auch der Bereich der satellitengebundenen Fernerkundung der Landoberfläche durchläuft gerade eine enorme Entwicklung und bietet der Landwirtschaft ein zusätzliches Potential der Informationsverdichtung mit abgeleiteten Boden- und Vegetationsdaten.

Moderne Radar- oder auch Mikrowellensatelliten senden aktiv elektromagnetische Wellen aus und messen das reflektierte Radarrückstreusignal. Radarwellen können Wolken durchdringen und auch bei Dunkelheit arbeiten. Dadurch ist es möglich, fast immer Informationen über die Erdoberfläche zu erhalten. Mikrowellen können je nach Wellenlänge bzw. Frequenz in natürliche Oberflächen eindringen. So können Aussagen über unterirdische Materialzustände getroffen werden.

Die Europäische Kommission hat in Zusammenarbeit mit der Europäischen Weltraumorganisation (ESA) 2013 das Copernicus Programm für satellitengestützte Erdbeobachtung installiert. Innerhalb dieses Programms sollen bis 2020 zwölf Satelliten gestartet werden, die so genannten „Sentinels“. Es handelt sich bei den Satelliten um 5-6 verschiedene technische Ausführungen, die für unterschiedliche Aufgaben konzipiert wurden. Für agrarmeteorologische Fragestellungen sind die Satelliten Sentinel-1 (Radarsystem) und Sentinel-2

(Multispektralsystem) besonders interessant, da sie neben meteorologischen Informationen auch wertvolle Informationen über die landwirtschaftlichen Kulturen bereitstellen können. Aufgrund ihrer hohen zeitlichen Wiederholraten über Deutschland und einer räumlichen Auflösung von 10-20 m wird eine kontinuierliche Beobachtung des Zustands landwirtschaftlicher Kulturen möglich.

Im April 2014 und April 2016 wurden die technisch identischen Sentinel-1A und -1B Satelliten gestartet. Die Radarsatelliten arbeiten mit Mikrowellen im C-Band (Wellenlänge ~ 6 cm, Frequenz: 5,405 GHz). Im Juni 2015 wurde der multispektrale Sentinel-2A Satellit gestartet. Das passive optische System misst die Reflexion des Sonnenlichtes von der Erdoberfläche in zwölf Spektralkanälen vom sichtbaren Blau bis zum mittleren Infrarot. Für diesen Satellit ist Bewölkung jedoch ein großes Problem, da die Daten für eine Auswertung der Landbedeckung unbrauchbar werden. Aufgrund der Lage Deutschlands in höheren geographischen Breiten überlappen sich die Flugbahnen der Sentinel-1A, -1B und -2A, so dass die meisten Regionen in Deutschland alle ein bis drei Tage überflogen werden. Die räumliche Auflösung beider Systeme beträgt 10 m.

Die häufigen Wiederholraten und die relative Witterungs-unabhängigkeit der Sentinel-1 Satelliten erlauben ein kontinuierliches Monitoring landwirtschaftlicher Flächen. Eine wichtige Anwendung ist die Erfassung der realen Landbedeckung, da diese Information die Grundlage für eine Vielzahl von Modellen und Systemen darstellt.



Abb. 9.4: Sentinel-2 Aufnahme vom 2. April 2016. links Falschfarbeninfrarot Darstellung, rechts Vegetationsindex NDVI. Mit dem Pfeil (links) sind Auswinterungsschäden markiert.

Neben der flächenscharfen Bestimmung der angebauten Kulturarten ist es nun auch möglich, landwirtschaftlich wichtige phänologische Zeitpunkte zu erfassen. Abbildung 9.3 zeigt die Radarrückstreusignaturen für verschiedene Wintergetreide im zeitlichen Verlauf. Sehr gut sind zum Beispiel die Zeitpunkte der Abreife und Ernte zu erkennen.

Optische Fernerkundungsdaten eignen sich unter anderem sehr gut zur Unterscheidung von vegetationsbedeckten und offenen Flächen. Abbildung 9.4 zeigt eine Falschfarbeninfrarot-Darstellung vom 2. April 2016. Unbewachsene Böden erscheinen hier hellblau, vegetationsbedeckte Flächen rot. Durch die Berechnung von Vegetationsindices, wie zum Beispiel dem NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), ist es schnell möglich Bestandes-Anomalien wie Auswinterungsschäden (siehe Pfeil) zu detektieren.

Die Kombination aus optischen und Radar-Fernerkundungsdaten eröffnet neue Möglichkeiten für ein kontinuierliches Monitoring und die Bereitstellung verschiedenster Vegetationsparameter, wie z.B. Biomasse, Bedeckungsgrad, Fruchtarten, Fruchtfolgen und Vieles mehr. Das Potential der Copernicus Daten ist sehr groß und wird derzeit wissenschaftlich erschlossen.

Der Landwirtschaft der Zukunft wird durch die Fernerkundung ein enormes Potential geboten. Wenn z.B. Bestandsgrößen als physikalische Datensätze vom Satelliten gemessen direkt in Farmmanagementsysteme einfließen können, eröffnet dies im Bereich der integrierten Nutzung der Systeme völlig neue Wege zur ökologischen und ökonomischen Optimierung sowie zur Einhaltung der guten fachlichen Praxis.

Künftig werden Webservice lokale Daten (Wetter- und Bestandsdaten) mit den Servern der Wetterdienste verbinden. Die lokal gemessenen Größen werden im Großrechner zusammen mit den Daten aus der Fernerkundung und der agrarmeteorologischen Prognose ausgewertet, um eine bestmögliche, schlaggenaue Information für das Farmmanagementsystem zu erstellen, aus dem dann wiederum eine optimale Umsetzung von ackerbaulichen Maßnahmen initiiert werden kann. Auch wenn die Kommunikation in den nächsten Jahren noch per Smartphone abgewickelt werden wird, so ist klar, dass Farmmanagement- und Wetterdatensysteme zukünftig direkt miteinander kommunizieren werden. Die hierfür erforderlichen Schnittstellen sind zu entwickeln und weltweit zu normieren, damit ein vom jeweiligen Maschinenhersteller unabhängiger Datenaustausch zu gewährleisten ist.

# Glossar

<b>Anaerobie (Aerobie)</b>	Die Verfügbarkeit von Luftsauerstoff ist für die Art der bakteriellen Zersetzungs Vorgänge entscheidend. Herrscht zum Beispiel in bestimmten Bodenhorizonten Sauerstoffmangel, so werden andere (anaerobe) Bakterien in biologischen Zersetzungs Vorgängen aktiv als bei ausreichender Sauerstoffversorgung (aerobe Bedingungen)
<b>Apothezien</b>	Fruchtkörper mancher Schlauchpilze (Ascomyceten)
<b>Bodenfeuchte</b>	Wassergehalt im Boden; wird in der Regel in Volumenprozent angegeben. Das Wasser lagert sich im Boden in den Poren ein. In den kleinen Poren kann das Wasser gegen die Schwerkraft im Boden gehalten werden. Die Porenzusammensetzung im Boden ist somit maßgeblich für das Wasserspeichervermögen des Bodens verantwortlich.
<b>CCM-Mais</b>	Abkürzung für Corn-Cob-Mix und ist ein meist in der Schweinemast eingesetztes Futter, das aus der Spindel und den Körnern des Maiskolbens besteht.
<b>Dekade</b>	Zeitraum von 10 Jahren.
<b>Evapotranspiration</b>	Die tatsächliche Evapotranspiration ist die Wassermenge, die von einem Pflanzenbestand unter natürlichen Bedingungen an die Atmosphäre abgegeben wird. Sie ist immer kleiner, höchstens gleich der potentiellen Verdunstung. Die potentielle Evapotranspiration ist die Wassermenge, die von einem Pflanzenbestand bei ausreichender Nährstoff- und Wasserversorgung in Form von Wasserdampf an die Atmosphäre abgegeben wird. Sie stellt die maximal mögliche Verdunstung dar.
<b>FAO</b>	Food and Agriculture Organization of the United Nations – Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen
<b>Feldkapazität</b>	Anteil des Bodenwassers, das entgegen der Schwerkraft im Boden gehalten wird.
<b>Folientypen</b>	Beim Anbau von Speisekartoffeln kann durch den Einsatz von z. B. Lochfolien (500 Löcher/m <sup>2</sup> ), Thermofolien und Vlies eine Ernteverfrühung und Qualitätsverbesserung erreicht werden.
<b>Frosthärte</b>	Zum Ende der Vegetationsperiode wird die Winterruhe durch kürzere Tageslängen und sinkende Nachttemperaturen eingeleitet. Pflanzen, die im folgenden Frühjahr weiter wachsen, reagieren darauf mit einem deutlich geringeren Wassergehalt in ihren Zellen sowie durch Bildung von «Gefrierschutzmitteln» (z. B. Zuckern), die verhindern, dass die wässrige Zellflüssigkeit gefriert und die Zellen zerstört.
<b>Gradtage</b>	Temperatursummen zur Bestimmung der Entwicklung von Pflanzen und Schaderregern haben die Einheit Gradtage, da die Tagesmitteltemperatur oberhalb einer Grenztemperatur aufsummiert wird.
<b>ICON</b>	Ein Wettervorhersagemodell des DWD, welches global das Wetter vorhersagt. Dieses Modell hat ein spezielles Dreiecks-Modellgitter (Ikosaeder) woraus sich der Name ableitet (ICON = ICOSahedral Nonhydrostatic).
<b>Kältesumme</b>	Oder auch Kältereiz im Winter, den einige Pflanzen benötigen, damit sie ihr generatives Wachstum im Frühjahr beginnen können. Irgendeine über Winter gebildete Temperatursumme, die nicht nur negative Temperaturen berücksichtigt muss, denn der größte Kältereiz liegt bei Temperaturen um 8 °C.

<b>Kluten</b>	Als Kluten werden Erdklumpen bezeichnet. Bereits während der Saatbeet-Bereitung sollten vorhandene Kluten zerkleinert werden, da sie sonst später bei der Kartoffelernte in das Erntegut gelangen.
<b>latenter Befall</b>	latent - nicht sichtbar; Das Pflanzgut ist bereits infiziert, aber die Symptome sind erst später nach Ausbruch der Krankheit an der Pflanze sichtbar.
<b>Lignifizierung</b>	Die Einlagerung von Lignin führt zu einer Verfestigung bzw. Verholzung von pflanzlichen Zellen.
<b>Linienbonitur</b>	Entlang einer Linie werden in einem gleichbleibenden Abstand die Pflanzen auf Krankheiten oder Schädlingen untersucht.
<b>Luftfeuchte (Taupunkt, Tau)</b>	Der in der Atmosphäre enthaltene Wasserdampf wird als Luftfeuchte bezeichnet. Luft kann abhängig von der Temperatur unterschiedlich viel (gasförmigen!) Wasserdampf aufnehmen, je höher die Temperatur, desto mehr (bei 22 Grad Celsius knapp doppelt so viel wie bei 11 Grad Celsius). Die relative Luftfeuchte eines Luftpaketes (ist vereinfacht ausgedrückt) der prozentuale Anteil des in der Luft enthaltenen Wasserdampfs, bezogen auf den maximal möglichen Wasserdampfgehalt (bei der aktuellen Temperatur). Unter dem Taupunkt wird jene Temperatur verstanden, auf die das Luftpaket abgekühlt werden muss, damit der in ihm enthaltene Wasserdampf zu flüssigem Wasser (Wassertröpfchen) kondensiert. Der Taupunkt wird daher durch die in der Luft enthaltene Wasserdampfmenge und durch die Temperatur bestimmt.
<b>mastiger Bestand</b>	üppiger Bestand
<b>Minierfraß</b>	Durch die Fraßtätigkeit der Larven werden Gänge (sogenannte Minen) in Blättern und Stängeln angelegt.
<b>Modell</b>	Modelle stellen vereinfachte Abbildungen komplexer realer Zusammenhänge dar, bei denen die natürlichen Prozesse durch möglichst gut an die Natur angepasste „Rechenvorschriften“ abgebildet werden. Das heißt: Durch Reduktion auf wenige Parameter (Rechengrößen) werden die Prozesse so weit vereinfacht, dass eine Berechnung möglich wird. Ziel ist es, Prognosen über zukünftige (oder auch Erklärungen für vergangene) Entwicklungen treffen zu können. Je langfristiger Modellberechnungen angelegt sind, desto schwieriger werden Prognosen. Hier bleibt nur die Möglichkeit, Szenarien mit unterstellten Entwicklungen zu berechnen (z.B. Klimaveränderung in Abhängigkeit von der Höhe des unterstellten zukünftigen CO <sub>2</sub> -Ausstoßes).
<b>nutzbare Feldkapazität</b>	Pflanzenverfügbare Anteil des Bodenwassers (Feldkapazität minus Welkepunkt), das die Pflanzen mit den Wurzeln aufnehmen können.
<b>Parameter</b>	Wird in vielen Zusammenhängen benutzt und ist häufig mit Variablen gleichzusetzen. In der Regel sind Parameter veränderbar und beschreiben lediglich einen Teilaspekt von einer Gesamtbetrachtung.
<b>Perzentil</b>	Ist ein Begriff aus der Statistik. Das x % Perzentil ist sozusagen ein Schwellenwert innerhalb eines geordneten Datensatzes bei dem x % aller Werte kleiner oder gleich dieses Schwellenwertes x sind. Der Rest ist größer. Da der Datensatz geordnet ist, lassen sich aus den Perzentilen auch Wahrscheinlichkeiten oder Wiederkehrzeiten ableiten. Alle Ereignisse unterhalb von 5 % oder oberhalb von 95 % haben eine Wiederkehrzeit von mehr als 20 Jahre, von 1 % oder 99 % mehr als 100 Jahre.

<b>Projektionen (aufgrund von Modell-Szenarien)</b>	(Klima)Projektionen liefern eine Abschätzung der Änderung des (Klima)Mittelwertes.
<b>Stomata (Photosynthese, Turgor)</b>	Die Verfügbarkeit von Wasser bestimmt auch den Gasaustausch zwischen Atmosphäre und Blättern, da bei nicht ausreichender Wasserversorgung die Stomata (=Spaltöffnungen) der Blätter geschlossen werden (da der Turgor= Flüssigkeitsinnendruck in der Zelle sinkt) und somit auch der CO <sub>2</sub> -Fluss für die Photosynthese in das Blattinnere behindert wird.
<b>Taupunkt</b>	siehe Luftfeuchte
<b>Temperaturschwingung (Amplitude)</b>	Temperaturgang über Tag oder auch Jahr, der in der Regel durch ein Maximum und ein Minimum charakterisiert ist. Der Unterschied zwischen beiden wird als Amplitude bezeichnet.
<b>Thermografie</b>	bildgebendes Verfahren zur Anzeige von Oberflächentemperaturen. Hierbei wird die Intensität der Infrarotstrahlung (Wärmestrahlung) als Maß für die Temperatur gedeutet.
<b>Transmission (Reflexion)</b>	Durchlässigkeitsvermögen gegenüber Strahlung. Ein Teil der ankommenden Strahlung wird direkt reflektiert (Reflexion), transmittiert (Transmission) oder absorbiert (Absorption).
<b>Vorhersage (Prognosewahrscheinlichkeit)</b>	Wahrscheinlichkeit mit welcher Trefferquote die Prognose eintrifft.
<b>Wechselfrost</b>	Volumenänderung des Bodens durch tägliches Tauen und Gefrieren der obersten Bodenschicht. Bei Winterkulturen wie Wintergetreide und Winterraps werden durch die Volumenänderung des Bodens die Wurzeln geschädigt, wobei es sogar zum Abreißen der Wurzeln kommen kann.
<b>Wegaufnehmer</b>	Sensor zur Erfassung von Verschiebungen (LVDT - Linear Variable Displacement Transducer)
<b>Welkepunkt</b>	Teil des Bodenwassers, das durch Adhäsion und Kohäsion so stark an die Bodenpartikel gebunden ist, dass es für Pflanzen nicht nutzbar ist.
<b>Zetten</b>	flächiges Verteilen des Mähgutes zum Trocknen.

## Autoren



### Prof. Dr. Beate Berkelmann-Löhnertz

Institut für Phytomedizin  
Hochschule Geisenheim University  
Von-Lade-Str. 1  
65366 Geisenheim  
Tel.: 06722 502 415  
beate.berkelmann-loehnertz@hs-gm.de

Studium der Biologie in Göttingen, anschließend Promotion im Fach Phytopathologie zum Thema mikrobielle Zönosen in der Nährlösung geschlossener Kultursysteme. Von 1992 bis 1997 Aufbau und Leitung der Abteilung „Diagnose von Krankheiten im Wein- und Gartenbau“ an der Forschungsanstalt Geisenheim. Hier seit 1997 wissenschaftliche Leitung der Abteilung „Rebkrankheiten“, seit 2013 Hochschule Geisenheim University. Lehrtätigkeit in den Fächern „Phytomedizin Weinbau“ sowie „Rebschutz“.



### Dr. Michael Blanke

INRES-Gartenbauwissenschaft  
Universität Bonn  
Auf dem Hügel 6  
53121 Bonn  
Tel.: 0228 735142  
mmblanke@uni-bonn.de

Studium der Agrarwissenschaften und Promotion an der Rheinischen Friedrich-Wilhelms Universität Bonn, Wissenschaftlicher Mitarbeiter und Dozent am INRES- Institut für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz, Forschungsaufenthalte an den Universitäten von Bristol (UK), Riverside (Kalifornien) und in Südafrika, seit 2009 Forschungsschwerpunkt Klimawandelfolgen für den Obstbau weltweit sowie Entwicklung von Adaptionsstrategien nach Auswertung und Digitalisierung historischer (60-jähriger) Wetter- und Phänologie-Aufzeichnungen auf dem Campus Klein-Altendorf, und Mitarbeit an europäischen Kooperationen zur Phänologie bei Obstgehölzen.



### Gottfried Bleyer

Abteilung Biologie, Referat Ökologie  
Staatliches Weinbauinstitut  
Merzhauserstr. 119  
79100 Freiburg  
Tel. (+49)0761/40165-28  
gottfried.bleyer@wbi.bwl.de

Studium des Weinbaus und der Oenologie in Geisenheim (Fachhochschule Wiesbaden). Langjährige Tätigkeit am Staatlichen Weinbauinstitut in Freiburg in der Abteilung Biologie mit den Schwerpunkten: Virustestierung und Nematodenuntersuchung; Leitung des Freilandversuchswesens Pflanzenschutz; Durchführung der Amtlichen Zulassungsprüfungen von Pflanzenschutzmitteln; Entwicklung von Prognosemodellen; Erarbeitung von nachhaltigen Pflanzenschutzstrategien basierend auf Prognosesystemen und deren praktische Umsetzung; Aufbau und Weiterentwicklung sowie Koordination der Internetplattform „VitiMeteo“.





### Falk Böttcher

Abteilung Agrarmeteorologie  
Deutscher Wetterdienst  
Dienstort Leipzig  
Postanschrift: PF 32 11 09  
D-04282 Leipzig  
Büro: Kärrnerstraße 68  
D-04288 Leipzig  
Tel.: +49 69 8062-9890  
falk.boettcher@dwd.de

Studium der Meteorologie an der FH Bund, Masterstudium Agrarwissenschaften/Agrarmanagement an der Hochschule Anhalt, seit 2005 Agrarmeteorologe beim Deutschen Wetterdienst, seit 2011 Lehrbeauftragter für Agrarmeteorologie an der HTW Dresden (Fakultät Landbau/Umwelt/Chemie)



### Stephan Brand

Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen  
Beratung Pflanzenbau, Biodiversität und Ressourcenschutz  
Am Sportplatz 6, 63607 Wächtersbach  
Tel.: 06053 7069076  
stephan.brand@llh.hessen.de

Stephan Brand ist tätig als Agrarberater mit den Schwerpunkten Pflanzenbau, Biodiversität und Ressourcenschutz.



### Christoph Burose

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft  
Referat 421 „Strategie und Koordinierung der Abteilung 4 (Ländliche Entwicklung, Absatzförderung, Agrarmärkte)“  
Wilhelmstr. 54  
10117 Berlin  
Tel.: 030 18 529 4478  
christoph.burose@bmel.bund.de

Studium der Agrarwissenschaften in Göttingen. Seit 1997 Referent im BMEL, zuständig für Fragen des landwirtschaftlichen Risikomanagements. Begleitung des Verbundforschungsvorhabens „Agrarrelevante Extremwetterlagen und Möglichkeiten des Risikomanagements“.



### Dr. Udo Busch

Geschäftsbereich Klima und Umwelt  
Leiter Abteilung Agrarmeteorologie  
Frankfurter Straße 135  
63067 Offenbach  
Tel. : 069-8062-4403  
Fax : 069-8062-4482  
Udo.Busch@dwd.de

Studium der Elektrotechnik und Meteorologie in Hannover. Promotion zum Thema „Erkennung von Sturmweatherlagen in globalen Klimasimulationen“. Von 1998 bis 2001 beim DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) in Oberpfaffenhofen im Bereich der statistisch – dynamischen Regionalisierung von Starkniederschlägen im bayrischen Alpenvorland tätig. Seit 2011 Leiter der Abteilung Agrarmeteorologie im Deutschen Wetterdienst.



**Dr. rer. nat. Dirk Engelbart**

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur  
Abteilung Wasserstraßen und Schifffahrt  
Robert-Schuman-Platz 1  
53175 Bonn  
Tel.: 0228 – 99 300 4240  
Dirk.Engelbart@bmvi.bund.de

Studium der Meteorologie, Laserphysik und Hydrologie/Wasserwirtschaft in Hannover. Promotion in der experimentellen Antarktischforschung. 1992-2009 beim Deutschen Wetterdienst; ab 1994 zuletzt als Leiter des Dezernates „Bodengebundene Fernerkundung“ des DWD am Observatorium Lindenberg. 2009-2016 stellv. Leiter des Referates DG22 (Meteorologie, Klimaüberwachung, Erdbeobachtung und Raumfahrtnutzung und DWD) im Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Seit Ende 2016 Leiter des Referates WS14 im BMVI (Umweltschutz für die Wasserstraßen, Anpassung an den Klimawandel, Gewässerkunde und Fachaufsicht über die Bundesanstalt für Gewässerkunde).



**Dr. Kristina Fröhlich**

Zentrales Klimabüro  
Geschäftsbereich Klima und Umwelt  
Deutscher Wetterdienst  
Frankfurter Str. 135  
63067 Offenbach  
Kristina.froehlich@dwd.de

Studium der Meteorologie und Promotion in Leipzig. Seit 2011 verantwortlich für die Entwicklung und den Betrieb der Jahreszeitenvorhersagen am DWD in einem gemeinsamen Projekt mit den Kollegen der Universität Hamburg und dem Max-Planck-Institut für Meteorologie Hamburg.



**Dr. Cathleen Frühauf**

Zentrum für Agrarmeteorologische Forschung Braunschweig  
Deutscher Wetterdienst  
Bundeallee 50  
38116 Braunschweig  
Tel.: 0531 52505 41  
cathleen.fruehauf@dwd.de

Studium der Meteorologie an der Humboldt Universität in Berlin. Promotion am Institut für Hydrologie und Meteorologie der Technischen Universität Dresden zum Thema Verdunstungsbestimmungen von Wäldern am Beispiel eines Fichtenbestandes im Tharandter Wald. Forschungsschwerpunkte liegen im Bereich des Wasserhaushaltes landwirtschaftlicher Kulturen und in den Auswirkungen des Klimawandels auf die Landwirtschaft. Seit 2002 in der Abteilung Agrarmeteorologie des Deutschen Wetterdienstes an der Außenstelle Geisenheim und am Zentrum für Agrarmeteorologische Forschung in Braunschweig. Lehrbeauftragte an der Hochschule Geisenheim University (2006-2008 Abiotische Grundlagen, seit 2010 Prognosemodelle im Weinbau).



#### Dr. Jan Gräfe

Leibniz-Institut für Gemüse- und Zierpflanzenbau (IGZ)  
Theodor-Echtermeyer Weg 1  
14979 Großbeeren  
Tel.: 033701 78363  
graefe@igzev.de

Studium der Agrarwissenschaften an der Humboldt Universität in Berlin und spätere Promotion zum Dr. rer. agr. zum Thema der mathematisch-physikalischen Beschreibung von Stoff- und Energieaustauschprozessen in Agrarsystemen mit dem Schwerpunkt von folienbedeckten Spargeldämmen. Aktuelle Arbeitsgebiete umfassen die Modellierung und Messung diverser pflanzenphysiologischer und physikalischer Zustände sowie des Energie- und Massenaustausches im System Boden-Pflanzenbestand-Atmosphäre.



#### Dr. Claudia Heidecke

Thünen-Institut für Ländliche Räume  
Bundesallee 50  
D-38116 Braunschweig  
Tel: (+49) (0)531 596 5519  
Mail: claudia.heidecke@thuenen.de

Dr. Claudia Heidecke studierte Agrarwissenschaften an der Universität Bonn und promovierte dort im Bereich Agrarökonomie zum Wassermanagement in der Landwirtschaft. Seit 2009 arbeitet sie am Thünen-Institut für Ländliche Räume in den Bereichen Ressourcennutzung, Umwelt- und Naturschutz zu Aspekten des Wassermanagements und des Klimawandels in der Landwirtschaft.



#### Prof. Dr. Antje Herrmann

Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung;  
Grünland und Futterbau / Ökologischer Landbau  
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel  
Hermann-Rodewald-Str. 9  
24118 Kiel  
Tel: 0431 880 7420  
aherrmann@gfo.uni-kiel.de

Studium der Agrarwissenschaften an der Justus-Liebig-Universität Gießen und Promotion zum Thema Modellierung der Ertrags- und Qualitätsdynamik von Weidelgras. Habilitation an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel. Arbeitsschwerpunkte umfassen die Optimierung von Managementmaßnahmen zur Steigerung der Ressourcennutzungseffizienz von Futter- und Biomasseproduktionssystemen, die prozessorientierte Modellierung dieser Systeme, die Bewertung der aus der Produktion resultierenden Umwelteffekte, sowie verschiedene Aspekte der Ertragsphysiologie.



#### Hubert Honecker

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), Bonn  
Ref. 511, Pflanzenbau  
Rochusstraße 1  
53123 Bonn  
Tel.: 0228 99 529 3602  
hubert.honecker@bmelv.bund.de

Hubert Honecker studierte an der Universität Gesamthochschule Paderborn, Fachbereich Agrar in Soest von 1978–1981 Landwirtschaft mit dem Schwerpunkt Pflanzenbau und Agrarökonomie. Als Dipl. Ing. für Landbau (FH) ist er im Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz tätig im Bereich der Düngung, des Bodens, der fachlichen Regelungen unter Cross-Compliance und der Eiweißpflanzenstrategie.



### Wolfgang Janssen

Abteilung Agrarmeteorologie  
Deutscher Wetterdienst  
Frankfurter Str. 135  
63067 Offenbach  
Tel.: 069 80624407  
wolfgang.janssen@dwd.de

Studium der Meteorologie in Hannover. Danach Forschungsvorhaben über die Winderosion und seit 1994 beim DWD in der Abteilung Agrarmeteorologie. Hier zuständig für die zeitkritischen agrarmeteorologischen Produktion und vorwiegend mit Programmierung und Modellierung beschäftigt.



### Dr. K. Christian Kersebaum

Institut für Landschaftssystemanalyse  
Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e. V.  
Eberswalder Straße 84  
15374 Müncheberg  
Tel.: 033432 82 394  
ckersebaum@zalf.de

Studium der Agrarwissenschaften, Fachrichtung Pflanzenbau an der Universität Göttingen, Promotion in Gartenbauwissenschaft am Institut für Bodenkunde der Universität Hannover zum Thema „Simulation der Stickstoffdynamik in Ackerböden“, 1989-1992 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Geographie und Geoökologie der TU Braunschweig, seit 1992 am Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung mit dem Schwerpunkt Modellierung von Interaktionen im System Boden-Pflanze-Atmosphäre. Leiter des Arbeitsgebiets Ökosystemmodellierung. 2004 Habilitation im Fachgebiet Geoökologie der Universität Potsdam.



### Dr. Holger Lilienthal

Julius Kühn-Institut (JKI)  
Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen  
Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde  
Bundesallee 50  
38116 Braunschweig  
Tel. 0531 596 2136  
holger.lilienthal@julius-kuehn.de

Studium der angewandten physischen Geographie an der Universität Trier mit den Schwerpunkten Fernerkundung und Klimatologie. Promotion an der Technischen Universität Braunschweig; 2000-2007 Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde der FAL Braunschweig; seit 2008 Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde des Julius Kühn-Instituts in Braunschweig. Forschungsschwerpunkte: Monitoring, Modellierung und Entscheidungshilfe für die Landwirtschaft auf Basis von Fernerkundungsdaten.



**Dr. Harald Maier**

Abteilung Agrarmeteorologie  
 Leiter Außenstelle Weihenstephan  
 Deutscher Wetterdienst  
 Alte Akademie 16  
 85354 Freising-Weihenstephan  
 Tel.: 08161 53769-11  
 harald.maier@dwd.de

Studium der Agrarwissenschaften an der TU München mit anschließender Promotion. Wissenschaftler bei der FAO in Rom, Bereich World Agriculture Information Center. Berater für die BayWa AG München, u.a. Konzepterstellung für den Internetauftritt. Derzeit Leiter der Ast. Weihenstephan des Deutschen Wetterdienstes, zuständig für Bayern und Baden-Württemberg. Lehraufträge an der Technischen Universität München, Wissenschaftszentrum Weihenstephan.



**Detlev Majewski**

Deutscher Wetterdienst  
 Frankfurter Straße 135  
 63067 Offenbach  
 Tel.: 069 8062 2718  
 detlev.majewski@dwd.de

Studium der Meteorologie an der Universität Bonn. Leiter der Abteilung Meteorologische Analyse und Modellierung im Geschäftsbereich Forschung und Entwicklung.



**Dipl.-Geogr. Kirstin Marx**

Thünen-Institut  
 Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei  
 Stabsstelle Boden  
 Bundesallee 50  
 D-38116 Braunschweig  
 Tel.: 0531 596 5244  
 kirstin.marx@thuenen.de

Seit dem 1. Juni 2015 arbeitet Frau Kirstin Marx in der Stabsstelle Boden des Thünen-Instituts in Braunschweig. Als Geografin hat Frau Marx an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel im Bereich Physische Geografie - Landschaftsökologie und Geoinformation mit dem Schwerpunkt Bodenschutz gearbeitet. Vor ihrer Kieler Zeit war Frau Marx in der Projektarbeit bei der Stiftung Ökologie & Landbau in Bad Dürkheim tätig - im Bereich ländliche Raumentwicklung, Agrar-Biodiversität und EU-Fördermittel.



**Dr.-Ing. Torben Meinert**

Zentrum für Agrarmeteorologische Forschung Braunschweig  
 Deutscher Wetterdienst  
 Bundesallee 50  
 38116 Braunschweig  
 Tel.: 0531 25205 42  
 torben.meinert@dwd.de

Studium der Meteorologie an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel. Promotion zum Dr.-Ing. am Lehrstuhl für Mess- und Informationstechnik der Universität der Bundeswehr Hamburg. Im DWD zunächst Mitarbeit in einem Projekt zur Nebelvorhersage in der Abteilung Flugmeteorologie, seit November 2012 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Zentrum für Agrarmeteorologische Forschung (ZAMF) Braunschweig mit dem Schwerpunkt Modellierung des Systems Boden - Vegetation - Atmosphäre.



### Dr. Marcus Paulat

Deutscher Wetterdienst  
Geschäftsbereich Wettervorhersage - Zentrale Fachleitung  
Frankfurter Str. 135  
63067 Offenbach  
Tel.: 069 8062 4419  
marcus.paulat@dwd.de

Leiter des Sachgebiets „Verifikation“ zur Prüfung der Qualität von Vorhersageprodukten im Geschäftsbereich Wettervorhersage des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Von November 2007 bis November 2010 im Deutschen Wetterdienst als Mitarbeiter des Innovationsprogramms zur Entwicklung eines Ensembles auf Basis COSMO-DE. Von 2004 bis 2007 Promotion am Institut für Physik der Atmosphäre der Universität Mainz zum Thema „Verifikation der Niederschlagsvorhersage für Deutschland von 2001-2004“ (bei Prof. Heini Wernli). Bis 2004 Studium der Meteorologie an der Universität Mainz.



### Saskia Pietzsch

Abteilung Agrarmeteorologie  
Deutscher Wetterdienst  
Frankfurter Straße 135  
63067 Offenbach  
Tel.: 069 8062 4408  
saskia.pietzsch@dwd.de

Studium der Geographie mit Schwerpunkt Geoökologie an der Johannes Gutenberg-Universität Mainz. Diplomarbeit betreut vom Deutschen Wetterdienst (DWD) zur raum-zeitlichen Analyse von Dürreperioden in der WMO Region VI (Europa und naher Osten). Seit 2010 als Sachgebietsleiterin für die Abteilung Agrarmeteorologie des DWD am Standort Offenbach tätig. Arbeitsschwerpunkte: Koordination der agrarmeteorologische Beratung, Phänologie, Fortbildung, Medienarbeit, Marketing.



### Dr. Bernhard Reichert

Deutscher Wetterdienst  
Geschäftsbereich Forschung und Entwicklung  
Frankfurter Str. 135  
63067 Offenbach  
Tel. 069 8062 2260  
bernhard.reichert@dwd.de

Dr. Bernhard Reichert ist Leiter der Meteorologischen Anwendungsentwicklung im Geschäftsbereich Forschung und Entwicklung des Deutschen Wetterdienstes. Seine Schwerpunkte liegen in der strategischen Planung, wissenschaftlichen Konzeption und Steuerung meteorologischer Fachverfahren zur Verbesserung des Wettervorhersage- und Warnprozesses im DWD. Er promovierte am Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg zur Simulation und Interpretation vorindustrieller und zukünftiger anthropogen bedingter Klimaschwankungen. In Forschungsarbeiten an der Columbia University, New York untersuchte er Klimasimulationen der vergangenen 1000 Jahre mit Hilfe von Baumring-Daten.



### Martin Schmidt

Abteilung Agrarmeteorologie  
Deutscher Wetterdienst  
Dienstort Leipzig  
Postanschrift: PF 32 11 09, D-04282 Leipzig  
Büro: Kärrnerstraße 68, D-04288 Leipzig  
Tel.: 069 8062 9891  
martin.schmidt@dwd.de

Studium an der FH Bund Fachbereich Wetterdienst sowie an der Hochschule Anhalt Fachbereich Landwirtschaft, Ökotropologie und Landschaftsentwicklung. Arbeitet beim Deutschen Wetterdienst in den Abteilungen Klima- und Umweltberatung sowie Agrarmeteorologie als Sachverständigengutachter und als agrarmeteorologischer Wetterberater.



### Hans Helmut Schmitt

Abteilung Agrarmeteorologie  
Deutscher Wetterdienst  
Frankfurter Straße 135  
63067 Offenbach  
Tel.: 063 8062 2301  
hans-helmut.schmitt@dwd.de

Agrarmeteorologischer Wetterberater beim Deutschen Wetterdienst. Von 1978 bis 2014 an der Außenstelle Geisenheim des DWD, in dieser Zeit auch Lehrbeauftragter für Agrarmeteorologie und Klimatologie an der Hochschule Geisenheim University. Seit 2014 in der Abteilung Agrarmeteorologie des DWD in Offenbach, Leitung des Sachgebiets agrarmeteorologische Beratung.



### Dr. Ute Schultheiß

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL)  
Referat 511, Pflanzenbau, Grünland  
Rochusstraße 1  
53123 Bonn  
Tel. 0228 99 529 4102  
Ute.Schultheiss@bmel.bund.de

Studium der Agrarwissenschaften an den Universitäten Kassel-Witzenhausen und Gießen; Schwerpunkte: Pflanzenbau, Grünlandwirtschaft und Bodenkunde. Langjährige Mitarbeiterin beim Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., Darmstadt; Themenbereiche Düngung und Gewässerschutz. Seit dem 01.09.2015 tätig im Referat Pflanzenbau und Grünland des BMEL mit den Themen allgemeiner Pflanzenbau, Boden und Nachhaltigkeit.



### Prof. Dr. Hans R. Schultz

Hochschule Geisenheim University  
Von-Lade-Str. 1  
65366 Geisenheim  
Tel.: 06722 502 201/-202/-203  
hans.reiner.schultz@hs-gm.de

Studium Weinbau und Önologie (FH Wiesbaden, Fachbereich Geisenheim) und Pflanzenbiologie und Gartenbau (University of California, Davis (UCD), USA). Promotion (Agrarwissenschaften) an der Universität Gießen. Forschungsjahre an der UCD und der Ecole Nationale Supérieure Agronomique in Montpellier. Ab 1995 Fachgebietsleiter Weinbau an der Forschungsanstalt Geisenheim (FAG), ab 2006 Institutsleiter für Weinbau und Rebenzüchtung und 2009 Direktor der FAG. Seit 2013 Präsident der neu gegründeten Hochschule Geisenheim.



**Direktor Josef Wiedemann**

BBV LandSiedlung GmbH  
Geschäftsleitung  
Karolinenplatz 2  
80333 München  
Tel. 089 590 682 960  
j.wiedemann@bbv-ls.de

Studium Landwirtschaft Fachhochschule Weihenstephan-Triesdorf, Geschäftsführer BBV-Computerdienst GmbH (1985-2012), Aufbau Wetterfaxverteilung in Bayern und Österreich, Vertreter des DWD und der ZAMG in der WMO-Tagung 1997 Pune/Indien mit dem Schwerpunkt Agrarmeteorologie, seit 2012 Leiter des Fachbereiches Agrardienste im BBV, seit 2015 Geschäftsführer BBV LandSiedlung GmbH



**Dr. Klaus-Peter Wittich**

Zentrum für Agrarmeteorologische Forschung Braunschweig  
Deutscher Wetterdienst  
Bundeallee 50  
38116 Braunschweig  
Tel.: 0531 25205 26  
klaus-peter.wittich@dwd.de

Studium der Meteorologie an der Universität Hannover. Dort Promotion im Rahmen eines flugsicherheitsthematisierten Sonderforschungsbereichs (Grenzschicht-/Flugmeteorologie). Anschließend FE-Tätigkeiten beim DWD in Offenbach und Braunschweig im Bereich der theoretischen und experimentellen Agrarmeteorologie.



**Fachliche Beratung:** LLD i.R., Prof. Dr. agr. Werner Buchner, Jahrgang 1947; Studium der Agrarwissenschaften an der landwirtschaftlichen Fakultät der Universität Bonn, Promotion zum Dr. agr., Referatsleiter Pflanzenbau und Nachwachsende Rohstoffe bei der LWK Nordrhein-Westfalen, Leitung wissenschaftlicher FE-Vorhaben im Bereich Klima, Pflanzenschutz, Rekultivierung, Abwärmenutzung; als Honorarprofessor Lehrbeauftragter für Agrarklimatologie an der landwirtschaftlichen Fakultät Bonn und der FHS Südwestfalen in Soest



## KTBL-Veröffentlichungen



### **Klimaschutz in der Landwirtschaft**

Emissionsminderung in der Praxis

2017, 60 Seiten, 9 €, als Download 7 €, Bestellnr. 40119

Das Heft liefert einen Überblick über die wichtigsten Quellen von Treibhausgasen in landwirtschaftlichen Betrieben und zeigt auf, wie Landwirte die Emissionen in ihrem Betrieb mindern können.



### **KTBL Taschenbuch Landwirtschaft**

2015, 288 S., Best.-Nr. 19518

Das KTBL-Taschenbuch Landwirtschaft ist ein Nachschlagewerk für all diejenigen, die Maschinen- und Verfahrenskosten kalkulieren und ihre Arbeitswirtschaft planen wollen. Für die wichtigsten pflanzenbaulichen Produktionszweige und Tierhaltungsverfahren findet der Nutzer arbeits- und betriebswirtschaftliche Daten.

### **Bestellhinweise**

Besuchen Sie auch unseren Internet-Shop [www.ktbl.de](http://www.ktbl.de)  
 Porto- und Verpackungskosten werden gesondert in Rechnung gestellt.  
 Preisänderungen vorbehalten. Wir freuen uns auf Ihre Bestellung.

Senden Sie diese bitte an:

KTBL, Bartningstraße 49, D-64289 Darmstadt | Tel.: +49 6151 7001-189 |

Fax: +49 6151 7001-123 | E-Mail: [vertrieb@ktbl.de](mailto:vertrieb@ktbl.de) | [www.ktbl.de](http://www.ktbl.de)

## BZL-Medien



### Forstliches Vermehrungsgut

Das Heft beschäftigt sich mit den Fragen, Anforderungen und Rechtsvorschriften für Anbieter und Käufer von forstlichem Vermehrungsgut. Im Kartenteil erhält der Leser einen Überblick über die gesetzlich ausgewiesenen Herkunftsgebiete der wichtigsten forstlichen Baumarten - eine wichtige Grundlageninformation für den Forstpraktiker: Denn die genetisch fixierten Eigenschaften des Saat- und Pflanzguts entscheiden für mehr als ein Jahrhundert über Zuwachsleistung und Risikoempfindlichkeit eines Waldbestandes. Ein aktuelles Verzeichnis der Prüfstellen ergänzt die Informationen.

Heft, 72 Seiten, 9. Auflage 2017, Bestell-Nr. 1164



### Berufsbildung in der Landwirtschaft

Wer als Landwirt oder Landwirtin im Wettbewerb bestehen will, braucht eine solide Berufsausbildung. Wie diese genau aussieht und welche alternativen Berufswege es gibt, darüber informiert dieses Heft. Es stellt dazu die wichtigsten Aufgaben und beruflichen Anforderungen vor und beschreibt die verschiedenen Bildungswege. Neben der Berufsausbildung zum Landwirt/-in und den beruflichen Fortbildungen gehört auch das Studium an Fachhochschulen und Universitäten zum Inhalt. Adressen der Hochschulen, die Ansprechpartner in den zuständigen Stellen für die Berufsbildung, die Rechtsgrundlagen sowie weiterführende Internethinweise sind aufgeführt.

Heft, 52 Seiten, 9. Auflage 2017, Bestell-Nr. 1189



### Integrierter Pflanzenschutz

Das Heft beschreibt das Konzept des integrierten Pflanzenschutzes. Neben acker- und pflanzenbaulichen Maßnahmen werden Schutz, Förderung und Einsatz von Nützlingen sowie der sachgerechte Einsatz von Pflanzenschutzmitteln nach dem Schadschwellenprinzip vorgestellt. Dabei flossen neueste Erkenntnisse des Modell- und Demonstrationsvorhabens „Demonstrationsbetriebe integrierter Pflanzenschutz“ der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung mit ein.

Heft, 48 Seiten, 7. Auflage 2017, Bestell-Nr. 1032



### Ohne Bienen keine Früchte

Die kleinsten Nutztiere liefern nicht nur Wachs und Honig, sie bestäuben auch fast 80 Prozent der Nutzpflanzen. Ohne Bienen als Bestäuber wäre die Auswahl an Lebensmitteln stark eingeschränkt und auch die Pflanzenvielfalt deutlich geringer. Der wirtschaftliche Wert dieser Bestäubungsleistung liegt um ein Vielfaches über dem des erzeugten Honigs. Das Heft vermittelt einen Einblick in die faszinierende Welt der Honigbienen. Die Futterquellen für die Bienen haben in den vergangenen Jahren abgenommen. Jeder Garten- und Balkonbesitzer kann dazu beitragen, dass genügend Bienenfutter vorhanden ist, indem er Pflanzen sät, die nektar- und pollenreich sind. Je vielfältiger, umso besser. Bienenschutz geht alle an!

Heft, 44 Seiten, Erstauflage 2017, Bestell-Nr. 1567



### **Gute fachliche Praxis – Bodenfruchtbarkeit**

Bodenfruchtbarkeit ist mehr als der Ertrag in Dezitonnen: Dazu gehören auch der Umgang mit Pflanzenschutzmitteln, die Düngung, die Fruchtfolge und ackerbauliche Maßnahmen. Die komplexen Zusammenhänge werden in der Broschüre erläutert und zwar mit Blick auf eine Verbesserung der guten fachlichen Praxis. Sie ist definiert im Bundesbodenschutzgesetz. Im §17 steht, dass die Bodenfunktionen, wie der Luft-, Wasser-, Nährstoffhaushalt, erhalten werden sollen. Mehr als 20 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler haben den Stand des aktuellen Wissens zum Thema Bodenfruchtbarkeit zusammengetragen.

Broschüre, DIN A4, 144 Seiten, Erstaufgabe, Bestell-Nr. 1585



### **Gute fachliche Praxis – Bodenbewirtschaftung und Bodenschutz**

In dieser Broschüre sind die neuesten Erkenntnisse für die Bodenbearbeitung, den Erosionsschutz und den Erhalt der organischen Substanz umfassend dargestellt. Zum Erhalt und zur Stärkung der Leistungsfähigkeit unserer Böden wendet die Landwirtschaft ein komplexes System der Bewirtschaftung an. Es beginnt mit der Bodenbearbeitung, die erfolgen soll, wenn die Böden gut befahrbar sind. Bodenschadverdichtungen können so vermieden werden. Wichtig ist darüber hinaus eine ausreichende Versorgung der Böden mit organischer Substanz, dem Humus. Zur guten fachlichen Praxis gehören zudem eine ausgewogene, am Bedarf der Pflanzen orientierte Düngung und ein verantwortungsvoller Einsatz von Pflanzenschutzmitteln.

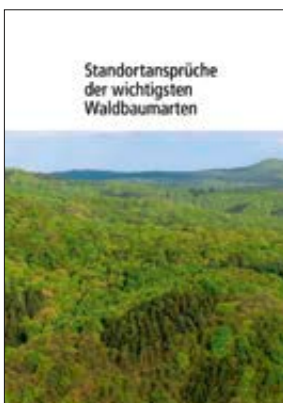
Broschüre, DIN A4, 120 Seiten, 2. Auflage 2015, Bestell-Nr. 3614



### **Mein Essen – Unser Boden**

Der Boden ist für uns so wichtig wie Sonne und Wasser. Das Heft zeigt, was Boden so elementar für unsere Ernährung macht, woraus er besteht und welche Bedeutung Regenwürmer, Pilze oder Algen für seine Fruchtbarkeit haben. Zudem wird erklärt, wie Landwirte ihre Böden pflegen, düngen und bearbeiten und welche Mengen an Lebensmitteln sie ernten. Auch zum Boden im Garten gibt es wertvolle Infos, z. B. einen Test zur Überprüfung der Bodengüte, Tipps zur Bodenbearbeitung und zur Verbesserung der Fruchtbarkeit. Weitere Infos zu Kompost, Blumenerde und zu den Ansprüchen verschiedener Obst- und Gemüsearten machen das Heft zu einer idealen Wissensquelle für alle, die mehr über unseren Boden erfahren wollen.

Heft, 52 Seiten, Erstaufgabe 2015, Bestell-Nr. 1627



### **Standortansprüche der wichtigsten Waldbaumarten**

Das Heft hilft dem Waldbesitzer, die Eignung der wichtigsten Baumarten für den Anbau in seinem Wald einzuschätzen. Im Hauptteil werden die grundlegenden Charakteristika und Standortansprüche der wichtigsten Waldbaumarten vorgestellt. Ein Kapitel gibt grundlegende Informationen zu den Ausgangsgesteinen, den Eigenschaften und dem Baumartenspektrum häufig vorkommender Waldböden in Deutschland. In einem Abschnitt stellt das Heft prinzipielle Ansatzpunkte zur Berücksichtigung des Klimawandels bei der waldbaulichen Planung und bei der Baumartenwahl vor.

Heft, DIN A5, 48 Seiten, 10. Auflage 2014, Bestell-Nr. 1095



### Biologischer Pflanzenschutz

Erfolgreich und umweltschonend sind biologische Verfahren zu einem festen Bestandteil beim Schutz der Kulturpflanzen vor tierischen Schädlingen geworden. Bei einigen Gewächshauskulturen werden sie mancherorts nahezu ausschließlich angewandt. Aber auch bei der Bekämpfung von Pflanzenkrankheiten und als vorbeugende Maßnahme zur Stärkung der pflanzeigenen Abwehrkräfte haben sie an Bedeutung gewonnen. Das Heft informiert über biologische und biotechnische Methoden im Freiland und unter Glas. Landwirte, Gärtner und Winzer erhalten Tipps zu Anwendungszeitpunkten, Ausbringmethoden und Ausbringmengen von Nützlingen und Mikroorganismen. Tabellen geben einen schnellen Überblick über deren Einsatzmöglichkeiten bei verschiedenen Kulturen.

Broschüre, 132 Seiten, 11. Auflage 2015, Bestell-Nr. 1030



### Das Weinrecht

Wer Wein anbaut, muss ein umfangreiches Regelwerk einhalten, das im Deutschen und im EU-Weinrecht festgelegt ist. Das Heft erläutert diese spannenden, aber zum Teil auch sehr komplizierten Rechtsvorschriften in leicht verständlichen Worten. Kernstück sind die Voraussetzungen für die Gruppeneinteilung der Weine, die amtliche Prüfung der neuen Jahrgänge und das EU-Weinbezeichnungsrecht. Große Übersichtskarten zeigen die Anbaubiete in Deutschland und Europa. Ein Glossar erklärt alle wichtigen Fachausdrücke. Damit ist das Heft eine unentbehrliche Hilfe für alle, die beruflich mit dem Wein verbunden sind. Aber auch Weinliebhabern bietet es viel Wissenswertes.

Heft, DIN A5, 56 Seiten, 27. Auflage 2017, Bestell-Nr. 1116



### Meldepflichtige Tierseuchen

Das Tierseuchenrecht sieht für diverse Krankheiten eine Meldepflicht für Tierärzte und Leiter von Veterinäruntersuchungsämtern vor. Behörden können die Verbreitung dieser Krankheiten auf diese Weise verfolgen. Die Broschüre stellt alle meldepflichtigen Tierkrankheiten vor, einschließlich ihrer Ursachen, Symptome, Infektionswege und Möglichkeiten der Bekämpfung. Zahlreiche Fotos veranschaulichen charakteristische Krankheitssymptome und erlauben eine erste Diagnose bei Verdacht auf Erkrankung. In der Neuauflage sind eine Reihe von Erkrankungen aktualisiert. Außerdem wird das Tiergesundheitsgesetz berücksichtigt: Es hat das Tierseuchengesetz abgelöst und enthält eine Reihe weiterer Regelungen zum Schutz vor und zur Bekämpfung von Tierseuchen.

Broschüre, 80 Seiten, 3. Auflage 2016, Bestell-Nr. 1564



### Besteuerung der Land- und Forstwirtschaft

Die Broschüre enthält die wesentlichen Inhalte im Steuerrecht, die für die Unternehmen im Agrarbereich relevant sind. Es beantwortet beispielsweise die Fragen: Wie grenzt sich die Land- und Forstwirtschaft bei der Besteuerung ab, bei Tierhaltung oder Reitbetrieb, bei Direktvermarktung oder außerbetrieblichem Maschineneinsatz? Was ist relevant bei der Grundsteuer oder der Erbschaftsteuer? Auch Umsatz, Grunderwerb, Strom- und Energie haben ihre eigenen Steuerregeln. Viel Raum wird der Einkommensteuer geschenkt. Ein Beispiel erleichtert das Verstehen. Schließlich dürfen Gewerbe- und Körperschaftsteuer nicht fehlen. Auch Informationen zu Verfahrensfragen, zu Rechtsschutz und Steuerberatung sind hier zu finden.

Broschüre, 96 Seiten, 8. Auflage 2017, Bestell-Nr. 1247

# Leittexte für Auszubildende im Agrarbereich

Eigenverantwortliches und selbstständiges Arbeiten ist im Berufsleben eine wichtige Voraussetzung, um erfolgreich zu sein. Genau darauf können sich Auszubildende in den Grünen Berufen mit sogenannten Leittexten vorbereiten. Diese werden von den zuständigen Stellen für Berufsbildung in Zusammenarbeit mit Praktikern entwickelt.

Die Aufgabenblätter werden vor Ort ausgefüllt – je nach Aufgabenstellung im Stall oder auf dem Feld, in Haus oder Küche, im Wald oder Weinberg. Dabei ist kein Leittext wie der andere, denn die einzutragenden Daten beziehen sich immer auf den jeweiligen Betrieb. So erhalten die Auszubildenden die Möglichkeit einzelne Aufgaben abzuwandeln, wegzulassen oder individuell zu ergänzen.

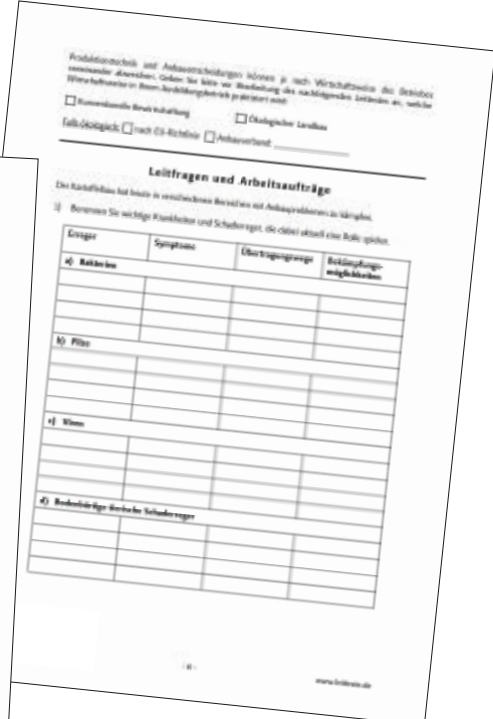
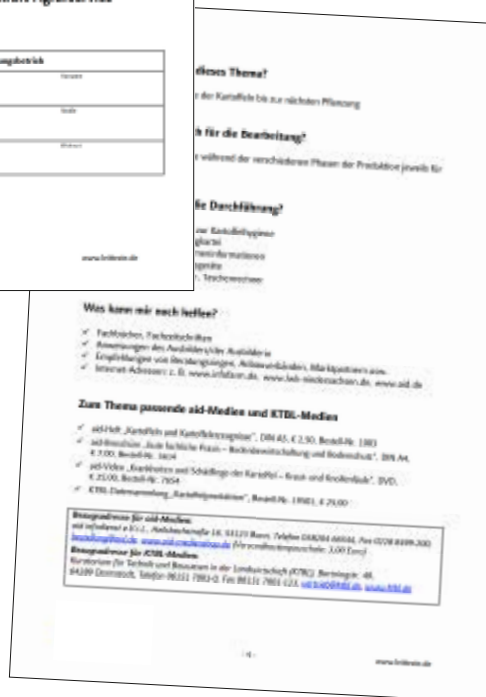
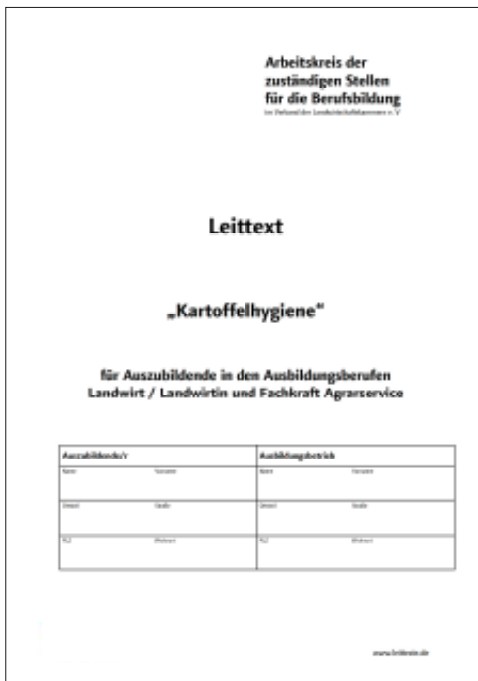
Für den Ausbildungsberuf Landwirt/Landwirtin stehen Leittexte zu mehr als 40 Themen zum kostenlosen Download bereit – zum Beispiel:

- Kartoffelhygiene
- Bestellen eines
- Getreideschlages
- Landwirtschaft und Wasserschutz
- Umweltgerechte Lagerung und Ausbringung von Gülle
- Fütterung von Milchkühen
- Geburt und Aufzucht eines Kalbes
- Funktionelle Klauenpflege beim Rind

Insgesamt stehen für diese acht Grünen Berufe mehr als 90 Leittexte zu verschiedenen Themen zur Auswahl:

- Fachkraft Agrarservice
- Forstwirt/Forstwirtin
- Hauswirtschafter/Hauswirtschafterin
- Landwirt/Landwirtin • Pferdewirt/Pferdewirtin
- Revierjäger/Revierjägerin
- Tierwirt/Tierwirtin
- Winzer/Winzerin

Alle Leittexte können kostenlos heruntergeladen werden unter [www.leittexte.de](http://www.leittexte.de)



## Pockets – Maxi-Wissen im Mini-Format

Für Verbraucherinnen und Verbraucher gibt das BZL „Pockets“ heraus: Sie sind im Format 10,5 x 10,5 cm und beantworten zwölf Fragen zu einem bestimmten landwirtschaftlichen Thema.

Folgende Pockets sind bisher erschienen:

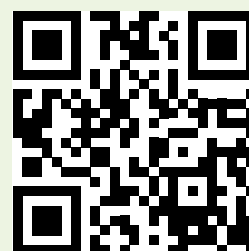
- » **Bauer sucht Wetter... Wetter, Klima, Landwirtschaft**  
2016, Bestell-Nr. 0411
- » **Ein gutes Tröpfchen – Wasser in der Landwirtschaft**  
2017, Bestell-Nr. 0433
- » **Schmetterlinge im Bauch? – Alles über Hülsenfrüchte**  
2016, Bestell-Nr. 0421
- » **Der Schatz unter unseren Füßen – Boden zum Leben**  
2015, Bestell-Nr. 0401



### Bestellungen an:

BLE-Medienservice  
c/o IBRo Versandservice GmbH  
Kastanienweg 1  
18184 Roggentin  
Telefon: +49 (0)38204 66544  
Telefax: +49 (0)228 8499-200  
bestellung@ble-medienservice.de

Alle Medien auch als Download: [www.ble-medienservice.de](http://www.ble-medienservice.de)



# Impressum

1651/2017

## Herausgeberin

Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE)

Präsident: Dr. Hanns-Christoph Eiden

Deichmanns Aue 29

53179 Bonn

Telefon: +49 (0)228 6845-0

Internet: [www.ble.de](http://www.ble.de)

## Redaktion

Dr. Volker Bräutigam, Wilfried Henke, Rainer Schretzmann, alle BZL in der BLE;

Referat 421 – Redaktion Landwirtschaft

## Text

Prof. Dr. Beate Berkelmann-Löhnert, Gottfried Bleye, Falk Böttcher, Stephan Brand, Christoph Burose, Dr. Udo Busch, Dr. Dirk Engelbart, Dr. Kristina Fröhlich, Dr. Cathleen Frühauf, Dr. Jan Gräfe, Dr. Claudia Heidecke, Prof. Dr. Antje Herrmann, Dr. K. Christian Kersebaum, Wolfgang Janssen, Dr. Holger Lilienthal, Dr. Harald Maier, Detlev Majewski, Kirstin Marx, Dr. Torben Meinert, Dr. Marcus Paulat, Saskia Pietzsch, Dr. Bernhard Reichert, Martin Schmidt, Hans Helmut Schmitt, Prof. Dr. Hans R. Schultz, Dr. Ute Schultheiß, Josef Wiedemann, Dr. Klaus-Peter Wittich,

## Layout

grafik.schirmbeck, Josef-Kreuser-Str. 80, 53340 Meckenheim

## Bilder

DWD-ZAMF:

F. Falke: Abb. 3.1.3, 3.2.1, 3.5.1, 6.1.1, 6.1.7, 6.1.8, 6.3.2, 6.4.4, 6.5.2, 6.5.4;

C. Frühauf: Abb. 3.3.2, 6.2.4, 6.2.5, 6.2.8, 6.3.5, 6.8.1, 6.8.2, 6.8.8, 6.8.16;

M. Meyer: Abb. 3.4;

K.-P. Wittich: Abb. 5.1.1, 5.1.2.a, 6.8.2 ;

R. Hennings: Abb. 5.2.2.b;

Perten Instruments GmbH: Abb. 6.1.9;

Landpixel: Titel, Abb. 6.2.9, 6.2.11, 6.4.7 sowie auf Seite 47, 58, 82, 88, 141, 151;

J. Gräfe, IGZ Großbeeren: Abb. 6.6.1, 6.6.2, 6.6.3, 6.6.4, 6.6.6;

Hochschule Geisenheim University: Abb. 6.8.10, 6.8.18, 6.8.20, 6.8.21, 6.8.24, 6.8.25, 6.8.26;

H. Findeis: Abb. 6.8.11, 6.8.12;

J. Kreiselmeier, DLR-Rheinpfalz: Abb. 6.6.7;

Universität Bonn:

M. Blanke: Abb. 6.7.1, 6.7.2, 6.7.10;

H. Kaufmann: Abb. 6.7.8;

A. Solomakhin: Abb. 6.7.11;

Pixabay: Abb. Seite 161

Rückseite:

© Kletr – [stock.adobe.com](http://stock.adobe.com)

© ThomBal – [stock.adobe.com](http://stock.adobe.com)

© Countrypixel – [stock.adobe.com](http://stock.adobe.com)

© iStock.com – tepic

## Druck

MKL Druck GmbH & Co. KG, Graf-Zeppelin-Ring 52, 48346 Ostbevern

Nachdruck oder Vervielfältigung – auch auszugsweise – sowie Weitergabe mit Zusätzen, Aufdrucken oder Aufklebern nur mit Zustimmung der BLE gestattet.

ISBN 987-3-8308-1297-5

© BLE 2017



Das Bundesinformationszentrum Landwirtschaft (BZL) ist der neutrale und wissenschaftsbasierte Informationsdienstleister rund um die Themen Land- und Forstwirtschaft, Fischerei, Imkerei, Garten- und Weinbau – von der Erzeugung bis zur Verarbeitung.

Wir erheben und analysieren Daten und Informationen, bereiten sie für unsere Zielgruppen verständlich auf und kommunizieren sie über eine Vielzahl von Medien.

[www.praxis-agrar.de](http://www.praxis-agrar.de)



Bestell-Nr. 1651  
Preis: 9,50 €