

Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben

Auswirkungen von Klimaveränderungen auf den Obstanbau in Hessen

im Rahmen des Programms **INKLIM 2012 II Plus**

des Hessischen Ministeriums für Umwelt, Landwirtschaft und Verbraucherschutz

Antragsteller und Ansprechpartner:

Prof. Dr. Peter Braun
Dipl. geogr. Markus Müller
Forschungsanstalt Geisenheim
Fachgebiet Obstbau
Von Lade Str. 1
D-65366 Geisenheim

Tel.: 06722-502566
Fax: 06722-502560
Email: braun@fa-gm.de

Weiterer Projektpartner

Prof. Dr. A. Hense,
Meteorologisches Institut der Universität Bonn
Auf dem Hügel 20
D-53121 Bonn

Tel.: 0228-735184
Email: ahense@uni-bonn.de

1. Hintergrund und Zusammenfassung

Die Vorhersage der Reaktion von Pflanzen auf mögliche Klimaveränderungen basiert auf zwei wesentlichen Komponenten, einem Modell der Reaktion der betreffenden Pflanzenart auf die wesentlichen Klimaparameter und einer Vorhersage der zu erwartenden Verteilung der entsprechenden Klimaparameter auf regionaler Basis.

Inzwischen gibt es mehrere voneinander unabhängige regionalisierte Klimaprojektionen aller relevanten Klimadaten. Die wichtigsten sind WETTREG, REMO und CLM, wobei in diesem Vorhaben Daten von WETTREG und REMO genutzt wurden. Der Entwicklung hinterher hinkt die Entwicklung realistischer phänologischer Modelle, also von Modellen, die bestimmte Entwicklungsschritte in der Pflanzenentwicklung in der erforderlichen Genauigkeit vorhersagen können.

Bisher wurden in der Regel lokal angepasste Modelle entwickelt. Diese sind so spezifisch für den einzelnen Standort, dass sie nicht allgemeingültig in der Fläche, d.h. einer größeren Region, angewandt werden können. Wir haben direkt ein allgemein gültiges Modell für die gesamte Fläche entwickelt und damit mögliche Fehler durch ein sehr spezifisches Stationsmodell ausgeschlossen. Die Arbeiten konzentrierten sich dabei auf die Winterperiode und den beginnenden Austrieb bzw. die Blüte, da hier im Obstanbau durch eine mögliche Erhöhung der Spätfrostgefahr im Frühjahr die wesentlichen Auswirkungen vermutet werden.

In einem ersten Schritt wurde mittels angepasster geostatistischer Modellbildung aus den phänologischen Beobachtungen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) das Blühdatum von Apfel für ganz Hessen seit 1951 in Karten dargestellt. Diese Karten enthalten Informationen zum Mittelwert und der Varianz in jedem Gitterpunkt und stellen somit eine sehr gute Möglichkeit dar, die Ergebnisse der zu erwartenden Veränderungen des Blühdatums vor dem Hintergrund der bereits erlebten Daten und Variabilität zu beurteilen.

In weiteren Schritten ist es dann gelungen, durch systematische Testung unterschiedlicher Temperatur gesteuerter Modelle ein mit akzeptablen Unsicherheiten behaftetes Modell zu entwickeln, das für ganz Hessen gültig ist und somit gut für eine Kopplung mit entsprechenden Klimaprojektionen geeignet ist.

Im nächsten Schritt wurde dann das phänologische Modell mit den Klimaprojektionen gekoppelt. Genutzt wurde dabei nur die Temperatur, da nur diese Klimavariablen als Eingangsvariable für das Modell benötigt wurde. Da die gridbasierten Daten von REMO nicht die gleichen Gitterpunkte hatten wie unsere phänologischen Karten, musste zwischen Gitterpunkten interpoliert werden. Die durchgeführte bilineare Interpolation mit Höhenkorrektur führte zu einer in dieser Größenordnung nicht erwarteten Verflachung der Temperaturdaten, da die Interpolation wie ein Tiefpassfilter wirkte und Extreme damit herausgerechnet wurden. Gerade bei der Kopplung von phänologischen Daten mit den Klimadaten kommt es aber auf eine realistische Wiedergabe der existierenden Varianz an. Dieser methodenbedingte Varianzverlust führte dazu, dass die regionalen Unterschiede, wie sie in Hessen in der Phänologie zu erwarten wären, nur zum Teil wiedergegeben werden konnten. Die Interpolation der stationsbasierten WETTREG-Daten erwies sich ebenfalls als schwierig, da hier deutlich weniger Stationen bzw. Ausgangspunkte für die Interpolation gegeben waren. Daher musste über größere Entfernungen interpoliert werden. Durch die große Entfernung zwischen den Stationen wurden hier die teilweise sehr spezifischen Standortbedingungen durch die Interpolation auf große Gebiete übertragen, d.h. der gegenteilige Effekt wie bei den REMO-Daten war zu beobachten. Die dabei entstehenden räumlichen Muster waren nur zum Teil plausibel.

Die Möglichkeiten zur Aussage, welche Veränderungen auf den Obstanbau in Zukunft zukommen, sind also nur sehr schwer und zurzeit nur sehr begrenzt möglich. Das mittlere

Blühdatum wird sich aber vermutlich bis zum bearbeiteten Zeitraum 2031-2060 im Verhältnis zu den letzten zwei Jahrzehnten nur noch wenig nach vorne verschieben. Bei der Gefahr von Spätfrösten zur Blüte ist für diesen Zeitraum im Vergleich zu den letzten 50 Jahren keine große Veränderung zu erkennen. Die Daten sind aber mit großer Vorsicht zu betrachten, da hier das Problem des Varianzverlustes in den Temperaturdaten sehr große Auswirkungen hat. Für die Kopplung von phänologischen Modellen mit Klimaprojektionen sind die Temperaturextreme und die realistische Wiedergabe der zu erwartenden Varianz entscheidend. Das wesentliche Ergebnis dieses Vorhaben ist also, dass die realistische Wiedergabe bei den hier verwendeten Interpolationsverfahren nicht gegeben ist.

2. Projektverlauf

Die geplante Vorgehensweise in diesem Vorhaben war:

1. Entwicklung eines allgemein gültigen phänologischen Modells für die Beispielkultur Apfel unter Nutzung der Daten des DWDs.
2. Erstellung von Karten für jedes phänologische Stadium von Apfel für jedes Jahr seit 1950 bis 2005 für das Land Hessen.
3. Klimaprojektion mittels der WETTREG-Daten (A2, B1).
4. Klimaprojektion mittels der Daten aus dem REMO-Modell (A2).
5. Klimaprojektion mittels der Daten aus den CLM-Läufen, falls diese rechtzeitig zur Verfügung stehen werden (A2).
6. Vergleich der Ergebnisse und Kartierung für das Land Hessen, Quantifizierung von Regionen mit abweichenden und mit übereinstimmenden Aussagen bis 2050.

Von der Reihenfolge her wurde Punkt 2 zuerst abgearbeitet und dann Punkt 1. Dies ist im folgenden Bericht auch so dargestellt. Das wichtigste phänologische Datum war dabei die Blüte, da es hier zu den größten Verschiebungen bedingt durch klimatische Veränderungen kommt und dies für die folgende Erstellung eines allgemein gültigen Modells auch das entscheidende Datum war.

Die historischen Karten konnten erstellt werden für die Jahre 1951-2005 (im Antrag wurde fälschlicherweise das Jahr 1950 als erstes Jahr genannt, aber es liegen nur Daten ab 1951 vom DWD vor) und sind als Einzelkarten für jedes Jahr im elektronischen Format als Anhang mitgeliefert. Bei einigen wenigen Jahren muss man bei der Interpretation sehr vorsichtig sein, da durch fehlende Daten in den datenleeren Gebieten unrealistische Muster entstehen. Die wesentlichen Ergebnisse des historischen Verlaufs der Phänologie des Apfels sind in diesem Bericht dargestellt.

Bei der Entwicklung eines allgemein gültigen Modells war das Ziel, nicht nur die 2m-Temperatur als entscheidende Variable zu nutzen, sondern eine realistischere Abbildung möglichst aller beeinflussenden Klimavariablen zu erreichen. Dies sollte in zwei Schritten erreicht werden. Über einen ersten Modelllauf nur mit der 2m-Temperatur als Eingangsvariable sollten die dann entstehenden Muster in einem zweiten Schritt mit anderen Klimavariablen bzw. Böden korreliert werden und die dann signifikanten Variablen mit in die Modellbildung einfließen. Es ist uns aber nicht gelungen, signifikante Muster zu finden und damit blieb dann nur die 2m-Temperatur übrig. Wir haben daraufhin ein für ganz Hessen gültiges Modell basierend allein auf der 2m-Temperatur entwickelt und dabei die unterschiedlichsten Vorgehensweisen geprüft. Dass hier das einfachste aller Modelle das beste war, war ein überraschendes, aber klares Ergebnis.

Dieses Modell wurde dann mit den Klimaprojektionen gekoppelt. Bei REMO wurde zuerst

mit dem mittleren Szenario A1B gerechnet. In dem zu bearbeitenden Zeitraum weicht das Szenario A1B wenig vom (im Antrag genannten) A2-Szenario ab und Unterschiede sind erst nach 2050 zu sehen. Da in dem vorliegenden Vorhaben nur bis zur Periode 2031-2060 gerechnet wurde, hatte die Wahl des Szenarios keinen Einfluss auf das Ergebnis. Da die REMO-Daten zwar eine ähnliche räumliche Auflösung haben (5 x 10 km bei den phänologischen Daten und 10 x 10 km bei REMO), die Gridpunkte aber versetzt waren, musste auf unsere Gridpunkte interpoliert werden.

Die WETTREG-Daten sind stationsbasierte Daten. Da wir in unserem Ansatz mit gridbasierten Daten arbeiten, mussten auf unser Grid interpolierte Daten aus WETTREG gewonnen werden. Das IDP als Ausgabewerkzeug für z.B. WETTREG-Daten lässt nur Projektionen auf 1/8° zu, während unsere phänologischen Daten auf 1/12° vorlagen. Daraufhin wurde ein standardmäßiges Interpolationsverfahren (bilineare Interpolation mit Höhenkorrektur) eingesetzt, wie es beim Projektpartner Meteorologisches Institut der Universität Bonn üblich ist. Die resultierenden Karten sind aber wenig plausibel, was vermutlich auf die Interpolation der Temperaturdaten zurückzuführen ist. Hier werden wohl zu sehr die „Stationseigenschaften“, die sehr standortspezifisch sein können, in den Raum projiziert. Statt der im Antrag vorgesehenen Szenarien B1 und A2 wurde nur mit dem A2-Szenario gerechnet, weil bei der Interpolation der Daten nicht plausible Muster entstanden.

Dagegen sind sowohl die REMO-Daten als auch die CLM-Daten gridbasierte Daten, die direkt genutzt werden konnten. Gearbeitet wurde zuerst mit den REMO-Daten, da diese früh genug vorlagen. Dabei zeigte sich aber, dass hier genau der gegenteilige Effekt auftrat. Bei der Regionalisierung der globalen Modelle kommt es offensichtlich zu einer Glättung der Daten, d.h. regionale Extreme in den Temperaturdaten werden verringert. Dies hat dann zum einen dazu geführt, dass z.B. die Projektionen des Blühbeginns eine stark verflachte Karte mit geringen regionalen Unterschieden zeigen. Zudem ist dann auch die entsprechende Analyse von z.B. der Häufigkeit von Spätfrösten um das Blühdatum herum betroffen, die deutlich weniger Frostereignisse als erwartet vorhersagt. Dasselbe Problem besteht nach Aussagen unseres Projektpartners Hense bei den erst spät zur Verfügung stehenden CLM-Daten. Da das grundsätzliche Problem daher in der Interpolation der regionalisierten Klimadaten liegt und Fehler nicht quantifizierbar sind, wurden die Klimaprojektionen mit den CLM-Daten nicht mehr gerechnet. Der als Punkt 6 vorgesehene Vergleich der Ansätze hätte damit auch keine objektive Aussage gebracht und wurde deshalb nicht gerechnet.

3. Vorbereitung der phänologischen Daten

3.1. DWD-Phänologiedaten – Prüfung

Die Bundesrepublik Deutschland verfügt seit fast 60 Jahren über ein sehr dichtes Netz von phänologischen Beobachtern, das vom DWD koordiniert wird. Schon aus der Anzahl der Beobachtungen einzelner Phasen für das Projektgebiet wird deutlich, dass eine Überprüfung der Daten nicht mehr "per Hand" erfolgen kann, sondern automatisch durchgeführt werden muss. Standardmäßig wird beim DWD nur die interne Konsistenz der beobachteten phänologischen Phasen getestet, so dass der Blühbeginn einer Pflanzenart in einem bestimmten Jahr und einem bestimmten Beobachtungsort zeitlich nicht nach dem Fruchtansatz in den Datenbestand eingehen kann. Allerdings gibt es noch eine Reihe anderer Fehler und Datenanomalien, die auf diese Weise nicht erfasst werden können, z.B. nicht repräsentative Beobachtungen oder Übermittlungsfehler wie Zahlendreher. Derartige Unsicherheiten in den Daten müssen erkannt und eliminiert werden. Erschwerend kommt

hinzu, dass die Beobachtungsorte relativ häufig wechseln und somit häufig nur kürzere Zeitreihen für einen Beobachtungsstandort vorliegen.

Ohne einen qualitätskontrollierten, homogenen Datensatz lassen sich mit den Rohdaten des phänologischen Beobachternetzes keine weiterführenden Analysen wie z.B. zu Klimawirkungsfragen durchführen. Als erster Schritt der Arbeiten erfolgte somit eine Qualitätsprüfung, die, methodisch bedingt, gleichzeitig homogenisierte Datensätze liefert. Der erste Schritt der Qualitätsprüfung ist die geostatistische Modellierung der Daten aus unabhängigen Größen (Hense et al., 2002; Hense und Müller, 2007). Dabei lassen sich bereits mit den Gegebenheiten völlig unvereinbare Daten erkennen und gleichzeitig ergibt sich die erwähnte Homogenisierung der Daten durch die Interpolation auf ein regelmäßiges Gitter.

3.2. DWD-Phänologiedaten – cross-validation

Will man einen ganzen Datensatz strenger überprüfen, so liegt es nahe, sequentiell alle Daten so abzuarbeiten, dass man jedes Mal ein Datum entfernt und das Feld aus dem verbleibenden Satz berechnet. Dann kann mit Hilfe des berechneten Feldes die Überprüfung des zuvor ausgeschlossenen Datums durchgeführt werden. Dieses Vorgehen wird auch als Kreuzvalidation bezeichnet. Da die Berechnungen sehr rechenintensiv sind, wird derzeit nur eine suboptimale, aber für viele Zwecke ausreichende Variante des Prüfverfahrens verwendet. Dazu wird die Abweichung zwischen dem berechneten Feldwert am Ort der Beobachtung und der Beobachtung selbst getestet. Wenn diese Differenz geringer als eine vorgegebene Schwelle ist, wird die Beobachtung akzeptiert. Allerdings muss man eine gewisse Vorsicht walten lassen, wenn die Daten noch nicht geprüfte Beobachtungen enthalten. In diesem Fall könnte es sein, dass nicht repräsentative Daten eine falsche Entscheidung provozieren. Deshalb wurde das Testverfahren in zwei Stufen realisiert. Ein erster Durchlauf versucht, nur die sehr unwahrscheinlichen Beobachtungen zu erkennen. Dazu wird der Prüfschwellwert auf 25 Tage gesetzt. Erst in einem zweiten Durchgang wird dann ein strengeres Maß mit einem Schwellwert von 15 Tagen an die Daten angelegt. Schließlich kann man die mittlere quadratische Abweichung (MSE) als Summe über die Kreuzvalidationsschritte aller gültigen Beobachtungen definieren. Dieser Wert dient der Kontrolle und gleichzeitig zum Nachweis einer Verbesserung der Analyse durch die Qualitätskontrolle. Typischerweise werden bei den Phänologiedaten des Deutschen Wetterdienstes 5 bis 10% der Daten durch eine derartige Qualitätskontrolle moniert. Die Verbesserung der Datenqualität lässt sich über die MSE nachweisen (Hense et al., 2002).

Das Verfahren ist methodisch bedingt empfindlich gegenüber dem Auftreten datenleerer Gebiete. Diese treten häufig durch aus geometrischen Gründen (rechtwinkliger Gebietsausschnitt) im Untersuchungsgebiet liegende Gebiete im Ausland auf, für die derzeit keine vergleichbaren Datensätze vorliegen. Im Fall Hessen tritt diese Randwertproblematik aufgrund der Binnenlage Hessens nicht auf. In Zukunft wird sich diese Problematik auch ohne zusätzliche Daten durch eine verbesserte Methodik vermeiden lassen.

3.3. DWD-Phänologiedaten – Projektion auf ein 1/12°-Gitter

Die Methode der Qualitätsprüfung liefert einen Datensatz für jede phänologische Phase, der auf einem 1/12° x 1/12°-Gitter und für jedes Jahr ein valides Datum liefert. Mit geeigneter Software lassen sich daraus Isophänen-Karten (Linien gleichen (mittleren) Datums des Auftretens einer phänologischen Phase), Zeitreihendarstellungen etc. gewinnen und Datensätze zur Weiterverarbeitung extrahieren.

Für jedes individuelle Jahr zwischen 1951 und 2005 liegen jetzt die modellierten Karten

aus den DWD-Phänologiedaten vor. Diese Karten lassen z.B. eine Analyse extremer Jahre zu. Stellt man das Flächenmittel des analysierten Phänodatums als Zeitreihe dar, so erkennt man den typischen Gang der langfristigen Variationen phänologischer Beobachtungen in den letzten 50 Jahren. Bis zum Ende der 80er Jahre waren die Phänophasen tendenziell später als der fünfzigjährige Mittelwert. Erst um 1990 erfolgte eine rapide Änderung in Richtung eines früheren Datums. Dieser Trend ist jedoch überlagert von der nicht unerheblichen interannuellen Variabilität der Witterung.

3.4. DWD-Phänologiedaten – Datensatz

Eingehender untersucht wurden die Phasen Beginn der Blüte (Phase 062 – Phasenbezeichnung nach BBCH Code, siehe Meier, 1997) und (Voll)Blüte des Apfels (Phase 063). Für diese Phasen liegen zahlreiche Beobachtungen vor und sie sind aufgrund der eindeutigen Erkennbarkeit der Phase vergleichsweise wenig fehlerbehaftet. Über das gesamte vorhandene Datenmaterial gemittelt tritt die Phase Vollblüte (1951-2005) am Tag 126 auf (dies entspricht dem 6. Mai).

Vollbluete Apfel (Mittel 1951–2005)

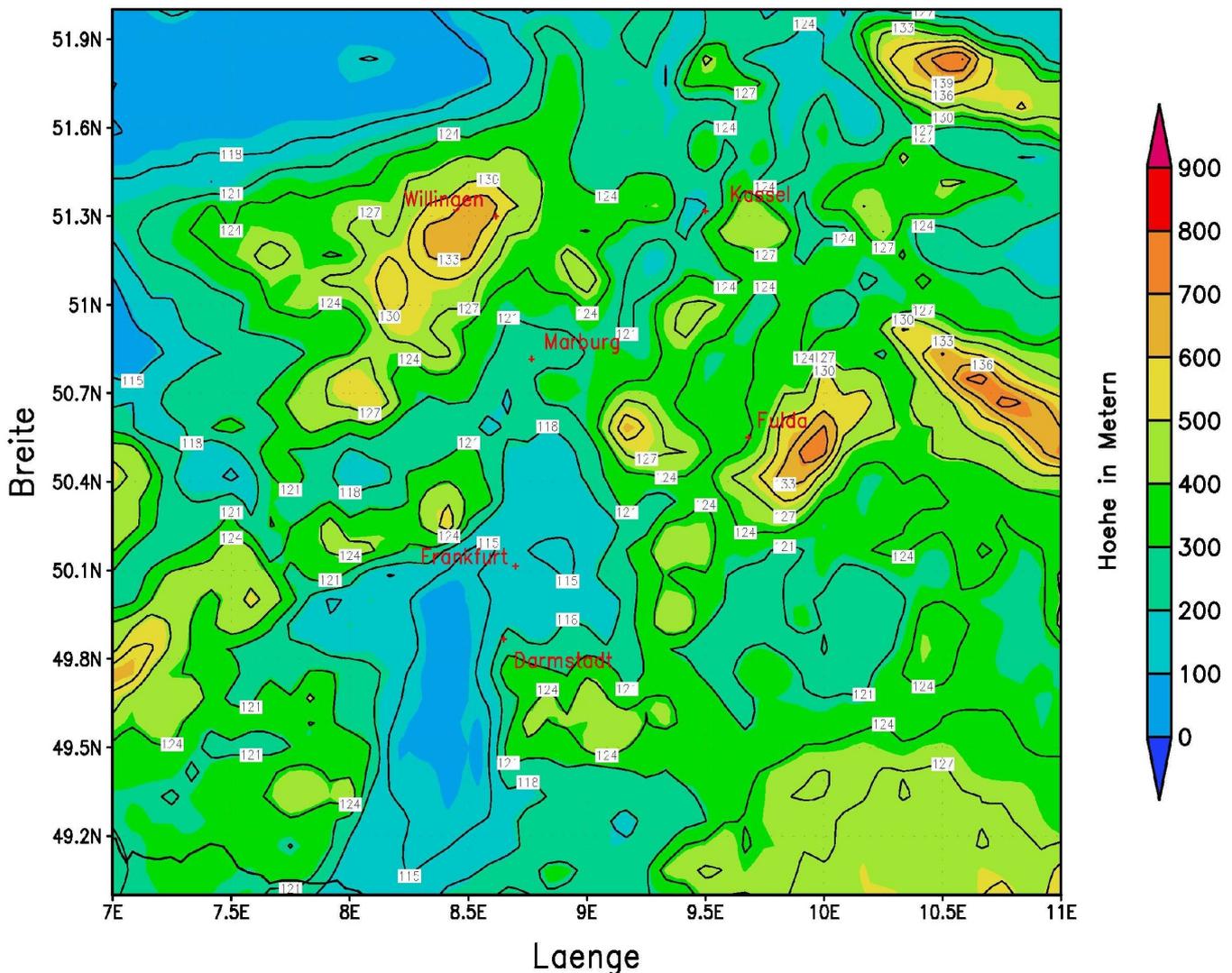


Abb. 1: Mittleres Datum der Vollblüte Apfel im Zeitraum 1951-2005. Die Isophänen sind Linien mit gleichem Blühdatum (Tag des Jahres), die Farben stellen die Höhe über NN dar.

Die Erstblüte tritt im Mittel 5 Tage vorher auf. Die Mittelwertskarte für Hessen zeigt, dass in den Niederungen Hessens die Vollblüte im Durchschnitt der Jahre 1951 bis 2005 deutlich früher eintritt, am Rhein und in der Wetterau vor dem 25. April (Tag 115) (Abb. 1). Im hohen Bergland (Rhön) wird die Blüte dagegen erst um den Tag 140 (20. Mai) erreicht. Ergebnisse für die Höhenlagen über 500-600 m sind aber vorsichtig zu interpretieren, da hier nur wenige Daten vorliegen.

Für die Phase 063 wird das extreme Jahr 1970 (Abb. 2 – sehr spätes Erblühen wegen des kalten Winters 1969/70 und des kühlen Frühjahrs 1970) und das Jahr 2000 (Abb. 3) mit einem besonders frühen Einsetzen der Blüte beispielhaft kartographisch dargestellt. Die zugrunde liegenden Datensätze liegen für alle analysierten Jahre vor. Die kartographischen Darstellungen der homogenisierten Felder zeigen in den beiden extremen Jahren unterschiedliche Muster. Die Variabilität zwischen den Jahren erreicht dabei eine der Variabilität in ganz Hessen innerhalb eines Jahres vergleichbare Größenordnung. Nach dem kühlen Frühjahr 1970 begann die Vollblüte des Apfels auch an der wärmebegünstigten Hessischen Bergstraße nicht vor dem 4. Mai (Tag 124 – Abb.2) und verzögerte sich im hohen Bergland bis Anfang Juni (Tag 157). Nach dem warmen Frühjahr des Jahres 2000 wurde im Hessischen Ried und an der Bergstraße die Apfel-Vollblüte schon am 19. April (Tag 109 – Abb. 3) verzeichnet und auch im hohen Bergland standen die Apfelbäume am 13. Mai (Tag 133) in voller Blüte.

Vollblüte Apfel 1970

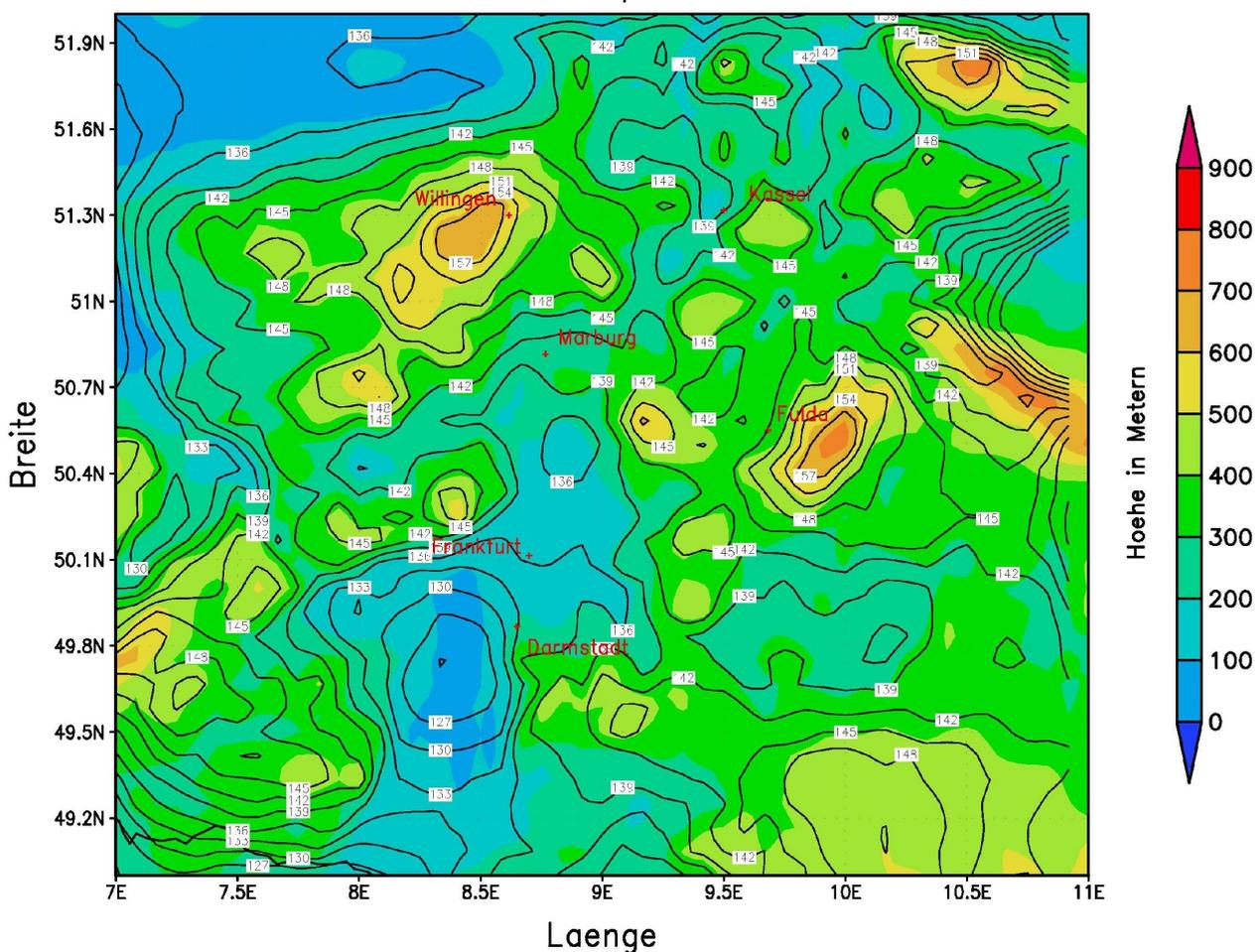


Abb. 2: Vollblüte beim Apfel im Jahr 1970 (spätestes Blühdatum). Die Isophänen sind Linien mit gleichem Blühdatum (Tag des Jahres), die Farben stellen die Höhe über NN dar.

Vollblüte Apfel 2000

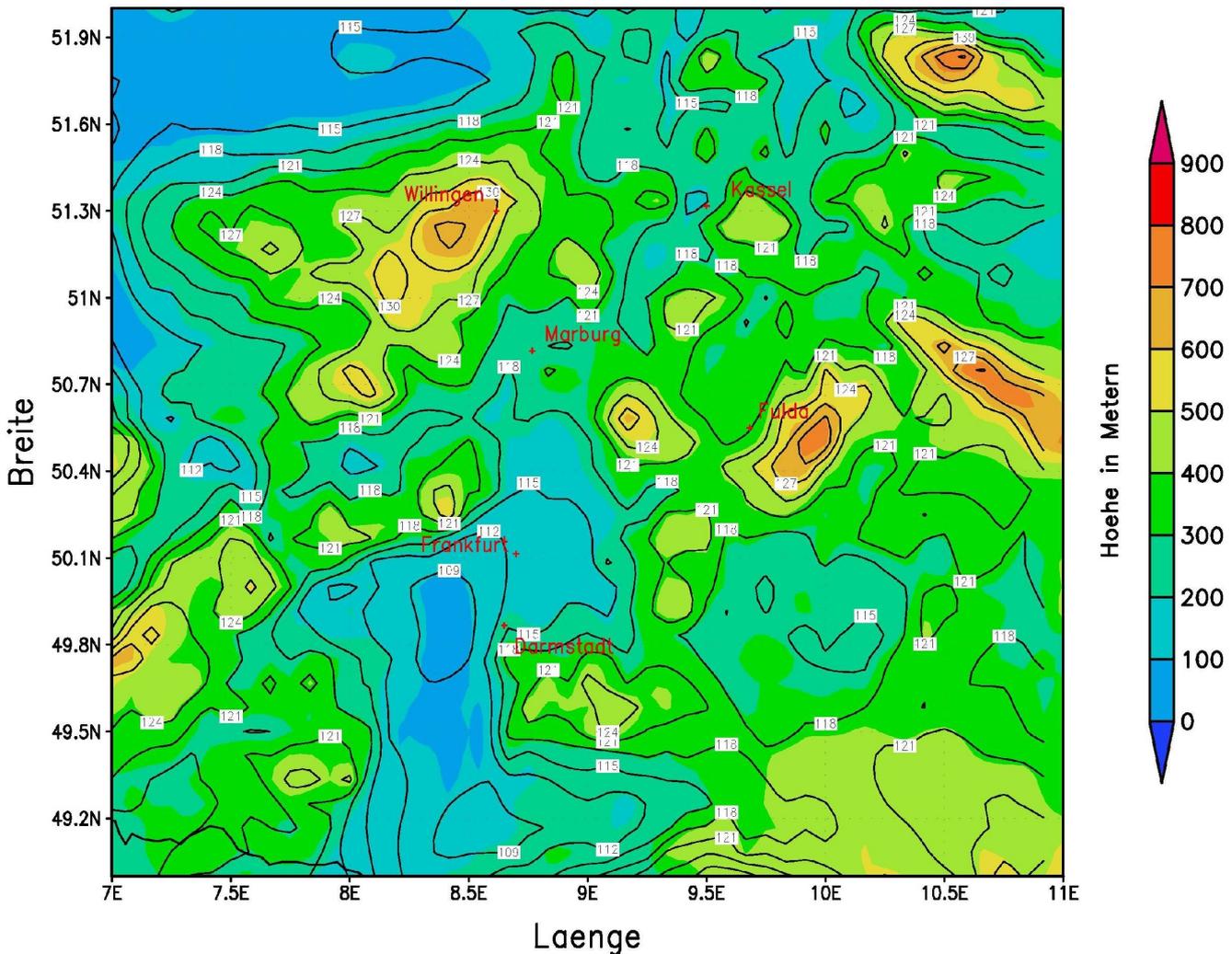


Abb.3: Vollblüte beim Apfel im Jahr 2000 (frühestes Blühdatum). Die Isophänen sind Linien mit gleichem Blühdatum (Tag des Jahres), die Farben stellen die Höhe über NN dar.

Insgesamt beträgt die Differenz des Blühdatums zwischen frühestem und spätestem Jahr etwa 20 Tage, doch gibt es Gebiete, in denen sich die Blühdaten nur um 18 (Niederungen, z.B. Frankfurt/Darmstadt) oder sogar um über 28 Tage (Bergland) unterscheiden. Dies belegt, dass mit den vorliegenden Methoden keine statischen Muster erzeugt werden, sondern die interannuelle Variabilität des phänologischen Geschehens in den homogenisierten Feldern gut reproduziert wird.

Dass die Muster von Jahr zu Jahr unterschiedlich sind, belegt, dass die Muster für die Zukunft nicht einfach durch lineare Interpolation für einzelne Standorte vorhergesagt werden können und eine detaillierte räumliche Analyse benötigt wird.

3.5. Re-Analysen – Berechnung der Modelleingangsvariablen

Unter einer Reanalyse versteht man die Analyse von vorhandenen Daten aus einem vergangenen Zeitraum mit heutigen, verbesserten Methoden. Ein besseres Resultat erhält man dabei nicht nur durch die verbesserten Analysemethoden, sondern auch dadurch, dass alle damals noch nicht vorliegenden Daten verwendet werden können. In die neue Analyse fließt somit auch eine größere Datenbasis ein. Man ist damit ggf. in der Lage, Trends von einzelnen Parametern zu erkennen, die für Klimastudien verwendet werden können. „ERA“ bedeutet hierbei ECMWF-Reanalyse, ECWMF steht für European Center for Medium Range Forecast.

Die ersten Reanalyse-Systeme gab es mit dem ERA-15, dem Vorgänger von ERA-40, und RA-1, der Reanalyse von NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction/ National Center for Atmospheric Research) in den 1990er Jahren.

Die Entwicklung von ERA-40 wurde im Jahr 2000 begonnen, da schnell einige Schwachstellen von ERA-15 bemerkt wurden. Die ERA-40-Daten beinhalten eine längere, 45 Jahre umfassende Zeitspanne von September 1957 bis August 2002. Phänologische Modelle können somit ab 1958 bis 2001/02 angetrieben werden.

Die ERA-40-Daten liegen in einer relativ groben räumlichen Auflösung vor, da bei der Entwicklung aus Kostengründen die Gitterweite von geplanten 39 km auf etwa 125 km ausdehnt wurde. Damit besitzen für Hessen nur noch 9 Gitterpunkte eine relevante Information.

Die zeitliche Auflösung der Daten beträgt 6 Stunden (0h, 6h, 12h, 18h UTC). Verwendet wurden aus diesen Werten gebildete Tagesmitteltemperaturen.

4. Raumunabhängiges Phänologiemodell Apfel

Die jährliche Entwicklung von Pflanzen kann nur sehr eingeschränkt bezüglich der (internen) physiologischen Vorgänge beobachtet werden. Deshalb stützt sich die Phänologie auf äußerlich möglichst leicht und eindeutig wahrnehmbare Veränderungen, die als sog. phänologische Phasen in ihrem zeitlichen Auftreten regelmäßig notiert werden. Typische phänologische Phasen bei Pflanzen sind z.B. Blüte, Blattentfaltung, Fruchtreife oder Laubfall.

Da die zugrunde liegenden physiologischen Vorgänge nicht genau genug bekannt sind, muss man bei der Entwicklung phänologischer Modelle, die das Eintreten der phänologischen Phasen in Abhängigkeit von Umweltfaktoren erklären sollen, die Pflanzen als eine "black-box" betrachten, die in unbekannter Weise die Umwelteinflüsse verarbeitet und als Ergebnis die phänologische Phase zeigt.

In vielen Klimaten ist die Temperatur ein limitierender Faktor bezüglich der Pflanzenentwicklung. Auch in Hessen ist dies bei den meisten Phasen der Fall. Somit liegt es nahe, in der Temperatur die Signale zu suchen, die das Eintreten der phänologischen Phasen steuern.

Temperaturdaten (zumindest Daten der Lufttemperatur in 2m Höhe) sind oft vorhanden und können als Schätzer für die eigentlich bedeutsame Gewebetemperatur verwendet werden. Weitere Einflussgrößen (Bodentemperaturen, solare Strahlung, Photoperiode, Feuchtigkeit) sind oft von Bedeutung, meist muss jedoch, um die Modelle einfach zu halten und aufgrund häufig nicht vorhandener Beobachtungen, von deren Nutzung zur Verbesserung der Modelle abgesehen werden.

Dies führt unmittelbar zu dem weit verbreiteten Temperatursummenkonzept. Die grundlegende Idee ist, dass nur Temperaturen oberhalb einer bestimmten Schwelle physiolo-

gisch wirksam sind. In dieser Modellvorstellung lässt man somit nur Temperaturen oberhalb einer bestimmten Schwelle wirksam werden. Diese werden ab einem festzulegenden Startzeitpunkt (meist im Winter) fortlaufend aufaddiert. Die Erfahrung zeigt, dass bei Erreichen einer bestimmten Temperatursumme eine bestimmte phänologische Phase eintritt. Dabei können Tagesmitteltemperaturen oder – besser – stündliche Temperaturen verwendet werden.

Die Annahme, dass unterschiedliche Temperaturniveaus unterschiedliche Bedeutung für Pflanzen haben, führt direkt zum nächsten Schritt der Modellbildung. Viele Pflanzen der mittleren und hohen Breiten haben Sperrmechanismen entwickelt, die verhindern sollen, dass empfindliche Entwicklungsphasen (v.a. die Blüte) sich einstellen, wenn zwar (vorübergehend) günstige Temperaturen herrschen, aber noch mit hoher Wahrscheinlichkeit schädliche Temperaturen auftreten können. Der Zustand der Wirksamkeit solcher Sperrmechanismen wird Dormanz genannt. Aus Sicht eines phänologischen Modells sind während der Dormanz an sich entwicklungsfördernde (höhere) Temperaturen noch nicht wirksam. Die Dormanz muss erst durch eine gewisse Andauer niedriger Temperaturen unterhalb einer pflanzenspezifischen Schwelle (chilling) gebrochen werden. In Modellen kann dies durch eine zweite Temperatursumme unterhalb einer bestimmten Schwelle abgebildet werden.

Hierbei treten jedoch Probleme auf, denn es ist erstens unklar, ab wann die Pflanze das Signal der tiefen Temperaturen akkumuliert. Zweitens ist von außen nicht beobachtbar, wann das Kältebedürfnis zum Durchbrechen der Dormanz erfüllt ist. Somit ist der Startzeitpunkt für das Aufsummieren von Temperaturen für die eigentliche Entwicklung der Pflanze von außen nicht erkennbar (d.h. es lässt sich keine von außen erkennbare Phase definieren, die das Ende der Dormanz anzeigt).

Ein viel genutztes Modell ist das sog. Utah-Modell, das ursprünglich von Richardson (1974) für die Blüte von Apfelbäumen entwickelt wurde und inzwischen von zahlreichen Autoren regional, sortenspezifisch sowie inhaltlich in der Verarbeitung des Temperatursignals angepasst wurde. Es berücksichtigt nur entwicklungsfördernde Temperaturen (forcing) und wird zu einem Zeitpunkt gestartet, von dem man annimmt, dass das Kältebedürfnis der Pflanze befriedigt ist. Typisch für diese Modelle ist die lokale und sortenspezifische Anpassung. Die gefundenen Temperaturschwellenwerte und -summen funktionieren nicht zufriedenstellend mit anderen Sorten oder an anderen Lokalitäten.

Chuine (2000) hat in einem "vereinheitlichten Modell" die Teilmodelle für das Kältebedürfnis und der Knospenentwicklung zusammengefasst. Der Vorteil eines solchen Modells ist unter anderem, dass man den Übergang von der Dormanzaufhebung zur Entwicklung flexibel fassen und auch fließend ineinander übergehen lassen kann. Man wird jedoch nicht von dem Umstand befreit, dass man das (nicht beobachtbare) Kältebedürfnis einer Pflanze sehr genau kennen muss, nur der Zeitpunkt des Entwicklungsbeginns lässt sich mit einem solchen Modell elegant beschreiben. Ein weiterer Vorteil des "vereinheitlichten Modells" ist, dass es sich – zumindest theoretisch – auf alle mehrjährigen Pflanzen mit einer winterlichen Dormanz durch Anpassen der freien Parameter anwenden lässt.

Um erste Erfahrungen in der Modellbildung im Projektgebiet zu gewinnen, wurde die phänologische Beobachtungsreihe aus Klein-Altendorf bei Bonn (50°37' N, 7°00' E) verwendet. Diese wird auf einem Versuchsgut der Universität Bonn gewonnen. Der Standort liegt zwar nicht in Hessen, aber noch im aus technischen Gründen betrachteten "rechtwinkligen" Modellgebiet, das ganz Hessen umfasst. Die Reihe wurde ausgewählt,

weil unmittelbar am Standort auch meteorologische Daten gewonnen werden und die sortenreine (Cox Orange) phänologische Reihe mit 50 Jahren eine den DWD-Daten vergleichbare Länge hat. Weiterhin kann von einer Homogenität der Beobachtungen und der Umgebungsbedingungen ausgegangen werden.

Die folgende Tabelle (Tab. 1) zeigt einen Vergleich verschiedener Modelle. Dabei wurde versucht, sie an den Standort über die Methode der kleinsten mittleren quadratischen Abweichung (MSE) optimal anzupassen.

Überraschenderweise schlossen die aus dem Utah-Modell abgeleiteten Modelle durchweg besser ab, insbesondere bei spätem Starttermin. Dies erklärt sich daraus, dass sich relativ tiefe Temperaturen als bester Schwellenwert ergaben, so dass bei einem früheren Starttermin schon im November und Dezember 'forcing-units' gesammelt wurden, offenbar zu einer Zeit, in der die Dormanz noch nicht durchbrochen war.

Die komplexeren Modelle erreichten nicht ganz die Vorhersagequalität der Utah-Modelle, konnten aber mit Temperaturschwellen betrieben werden, die der physiologischen Erfahrung eher entsprechen. Dabei ist zu bedenken, dass diese komplexeren Modelle bisher nur im submediterranen Klimaraum mit daran angepassten Pflanzen ausgiebig getestet wurden (Chuine 2000). Bei einer lokalen Anpassung wie mit dem Datensatz von Klein-Altendorf ergab sich ein mittlerer Fehler von ca. 2 Tagen. Bei dem für ganz Hessen gültigen Modell, das auf Daten mit deutlich größeren Fehlerquellen basiert (Beobachterfehler, keine sortenreine Informationen, keine Wetterstation direkt dabei), ergab sich ein mittlerer Fehler von ca. 4 Tagen. Das ist somit ein sehr guter Wert und das Modell kann als entsprechend zuverlässig beurteilt werden.

Tabelle 1: Entwicklung und Vergleich der Modelle: Utah-Modelle, progressive Utah-Modelle, generische Modelle mit getrenntem Chilling und Forcing für die Station Klein-Altendorf (Temperaturdaten: 1957-2001, in einigen Jahren fehlen phänologische Ereignisse wegen Blütenfrost)

#	Modell	Start	optimale Parameter	mittl. Fehler (Tage)
B	$\sum_{1.11.}^{BB} \frac{1}{(a \cdot (T-b))^2 + (c \cdot (T-b))}$	1.11.	a = 0,075 b = 5,0 c = 0,1	6,7
B2	$\sum_{1.11.}^{BB} \frac{1}{(a \cdot (T-b))^2 + (c \cdot (T-b))}$	1.11.	a = 0,07613 b = 16,1 c = 0,0000086	6,8
C	(T - b)	1.11.	b = 3,05	5,7
D	(T-b) ^a	1.11.	a = 1,1 b = 3,05	5,6
D2	(T - b) • a	1.11.	b = 3,2 a = 3,2 (wenn > 2. Tag) a' = 2,13 (2. Tag) a'' = 2,01 (1. Tag)	5,6
D3	(T - b) ^a	1.11.	b = 1,32 a = 0,95 (wenn > 2. Tag) a' = 1,13 (2. Tag) a'' = 1,2 (1. Tag)	5,6
F	(T - b)	1.12.	b = 4,3	5,5
G	(T - b)	1.1.	b = 2,48	4,1

B, B2: generische Modelle nach Chuine (2000). a, b und c sind freie Parameter.

C, F, G: einfache Utah-Modelle mit unterschiedlichen Startzeitpunkten nach Richardson et al. (1974). b ist die Basistemperatur

D: nicht linear gewichtetes Utah-Modell. b ist die Basistemperatur, a ist ein freier Parameter

D2, D3: Utah-Modelle mit unterschiedlicher Gewichtung zusammenhängender Tage mit "forcing-Bedingungen". b ist die Basistemperatur, a ist die Wichtung

5. Anwendung des Modells mit Projektionsdaten

Die Untersuchungen wurden mit den SRES-Szenarien A1B (REMO) und A2 (WETTREG) durchgeführt. Die Unterscheidung dieser beiden Szenarien ist für den Untersuchungszeitraum (bis 2060) jedoch nicht sonderlich relevant, da sich im Temperaturverlauf bei allen Szenarien bis dahin nur geringe Unterschiede ergeben.

Durch die Qualitätskontrolle und Homogenisierung der phänologischen Daten liegen diese als Zeitreihe auf einem $1/12^\circ$ -Gitter vor, das sich über ein Untersuchungsgebiet von 49°N bis 52°N und von 7°E bis 11°E erstreckt und somit ganz Hessen umfasst. Das bedeutet, dass für $37 \times 49 = 1813$ Punkte, von denen die meisten in Hessen liegen, homogenisierte Informationen jahresweise vorliegen.

Um die mit den ERA-40-Daten trainierten Modelle mit den REMO-Daten anzutreiben, waren diese ebenfalls auf dieses Gitter zu interpolieren. Dabei wurde ebenfalls eine bilineare Interpolation verwendet und eine Höhenkorrektur mit mittleren monatlichen Temperaturgradienten der freien Atmosphäre angewendet.

Als ein größeres Problem hat sich der Varianzverlust der interpolierten Daten erwiesen. Im Prinzip ergibt sich bei der bilinearen Interpolation von Temperaturdaten auf ein gegebenes Gitter ein gewichtetes arithmetisches Mittel. Dadurch ergibt sich eine Glättung der Daten. Inhaltlich erklärt sich dies hauptsächlich daraus, dass z.B. tiefere Temperaturen vom gleichzeitigen Auftreten mehrerer Bedingungen (z.B. Advektion, Aufklaren, Schneedecke, Vorgeschichte) am Beobachtungsort abhängen, diese aber nur selten gleichzeitig an allen am Interpolationsvorgang beteiligten Beobachtungsorten auftreten. Dadurch liegen die interpolierten Temperaturen grundsätzlich höher als die tiefste an der Interpolation beteiligte Temperatur (und niedriger als die höchste beteiligte), was zum Varianzverlust führt. Dies ist in vielen Fällen tolerierbar, da sich das Gesamtmittel nicht ändert. Es verursacht jedoch bei den phänologischen Modellen, die gerade die extremeren Temperaturen benutzen, systematische Fehler. Diese führen dazu, dass die Modelle mit sehr unphysiologischen und auch in der Literatur seltenen oder unbekanntem Schwellenwerten betrieben werden. Trotz der statistischen Optimierung ergeben sich dennoch oft vergleichsweise unbefriedigende Ergebnisse.

Zur Erzeugung von phänologischen Karten (Karten mit Isophänen, d.h. Karten mit Linien von gleichem zeitlichen Auftreten von phänologischen Ereignissen) wurde das beim Test in Klein-Altendorf erfolgreichste Modell G verwendet. Testweise wurden auch die anderen Modelle gestartet, doch ergaben sich die plausibelsten Ergebnisse wiederum mit dem einfachen Utah-Modell. Zudem lässt sich dieses Modell aufgrund der einfachen Mathematik und des Umstands, dass es nur einen freien Parameter gibt, leichter optimieren.

So zeigt die Karte der Erstblüte des Apfels unter dem Szenario A1B für den Zeitraum 2031-60 plausible geographische Verläufe der Isophänen (Abb. 4). Zwar lassen sich bestimmte geographische Strukturen wie z.B. das Mittelrheintal zwischen Koblenz und Rüdesheim nicht auflösen. Hier ist das Raster von $1/12^\circ$ noch zu grob, um das schmale Tal zu erfassen. Jedoch lassen sich weitgehend die Günst- und Ungünstgebiete plausibel differenzieren und auf bekannte Wirkungszusammenhänge wie Höhenlage und Anströmungsverhältnisse zurückführen. Auffällig ist jedoch die deutlich geringere „Struktur“ in der Abbildung. Hier kommt die weiter oben beschriebene Glättung der Temperaturdaten zum Tragen.

Modell G (REMO, A1B)
Erstbluete Apfel (Mittel 2031–2060)

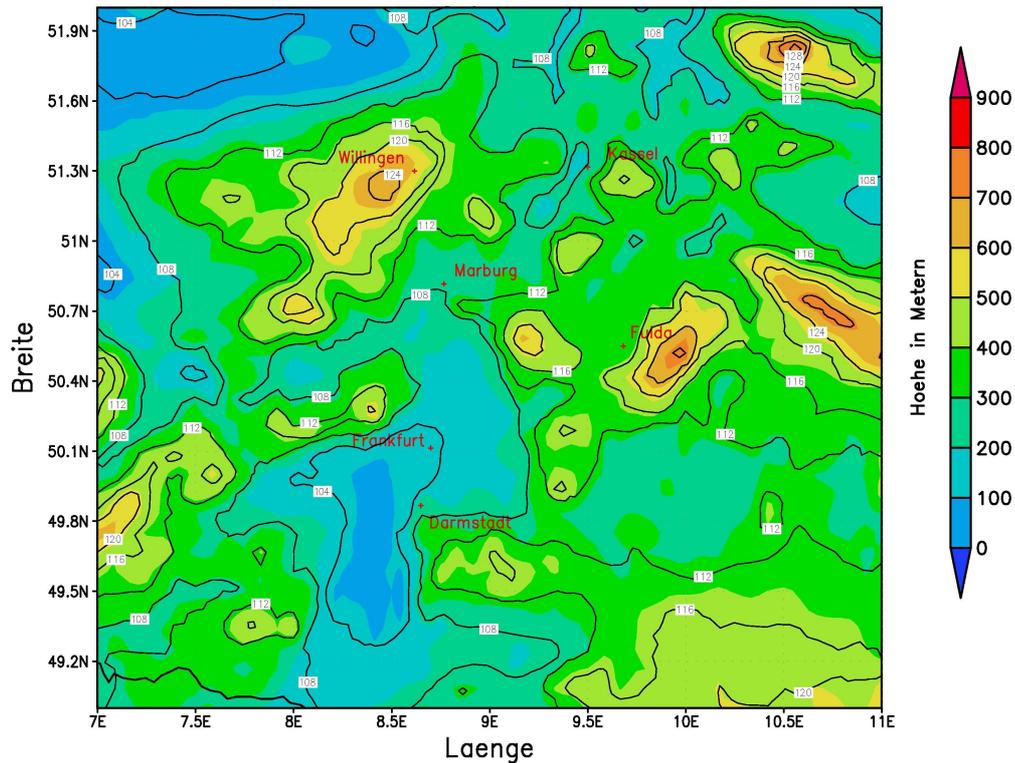


Abb. 4: Projektion der Erstblüte Apfel als Mittelwert der Periode 2031-2060 mittels der REMO-Daten des Szenarios A1B. Die Isophänen sind Linien mit gleichem Blühdatum (Tag des Jahres), die Farben stellen die Höhe über NN dar.

Insgesamt entsteht der Eindruck, dass die Niederungen im phänologischen Geschehen im betrachteten Szenario weniger beeinflusst sind als das mittlere und möglicherweise auch das höhere Bergland (s.u.). Um diesen Eindruck zu quantifizieren, könnte man einfach eine Subtraktion der vorhergesagten Daten von denen aus der Vergangenheit machen. Dies wäre aber nur korrekt, wenn man das phänologische Modell mit den historischen Temperaturdaten aus REMO antreiben würde und das dann für die Differenzrechnung nutzen würde. Dies haben wir aus Zeitgründen nicht gemacht. Um dennoch einen Überblick über regionale Unterschiede in der Verschiebung des Blühdatums zu bekommen, wurde die Projektion von den realen historischen Daten abgezogen. Das Ergebnis ist in der Abb. 5 zu sehen.

Im Falle der Blüte des Apfels ergibt sich ein komplexes Bild. Die Blüte des Apfels tritt dabei im REMO-Szenario durchweg früher auf, im Flächenmittel etwa 7 Tage. Vom Betrag her entspricht diese Änderung somit etwa einem Drittel der in den letzten 50 Jahren aufgetretenen Differenz der extremen Blühdaten. Generell ergeben sich die geringsten Änderungsbeträge im Tiefland (Niederrheinische Bucht, Wetterau, Oberrheingraben), teilweise aber auch im höheren Bergland (Rhön). In den nördlicheren Mittelgebirgen (insbesondere im Harz, Willinger Upland) ergeben sich dagegen die größten Änderungsbeträge, wenn es auch Hinweise darauf gibt, dass die Gipfellagen weniger stark betroffen sind. Zudem besteht generell ein leichter Gradient zu einer stärkeren "Verfrühung" der Apfelblüte von Südwest nach Nordost.

Differenz Projektion (2031–60) minus Beob. (1958–2001)

Erstbluete Apfel

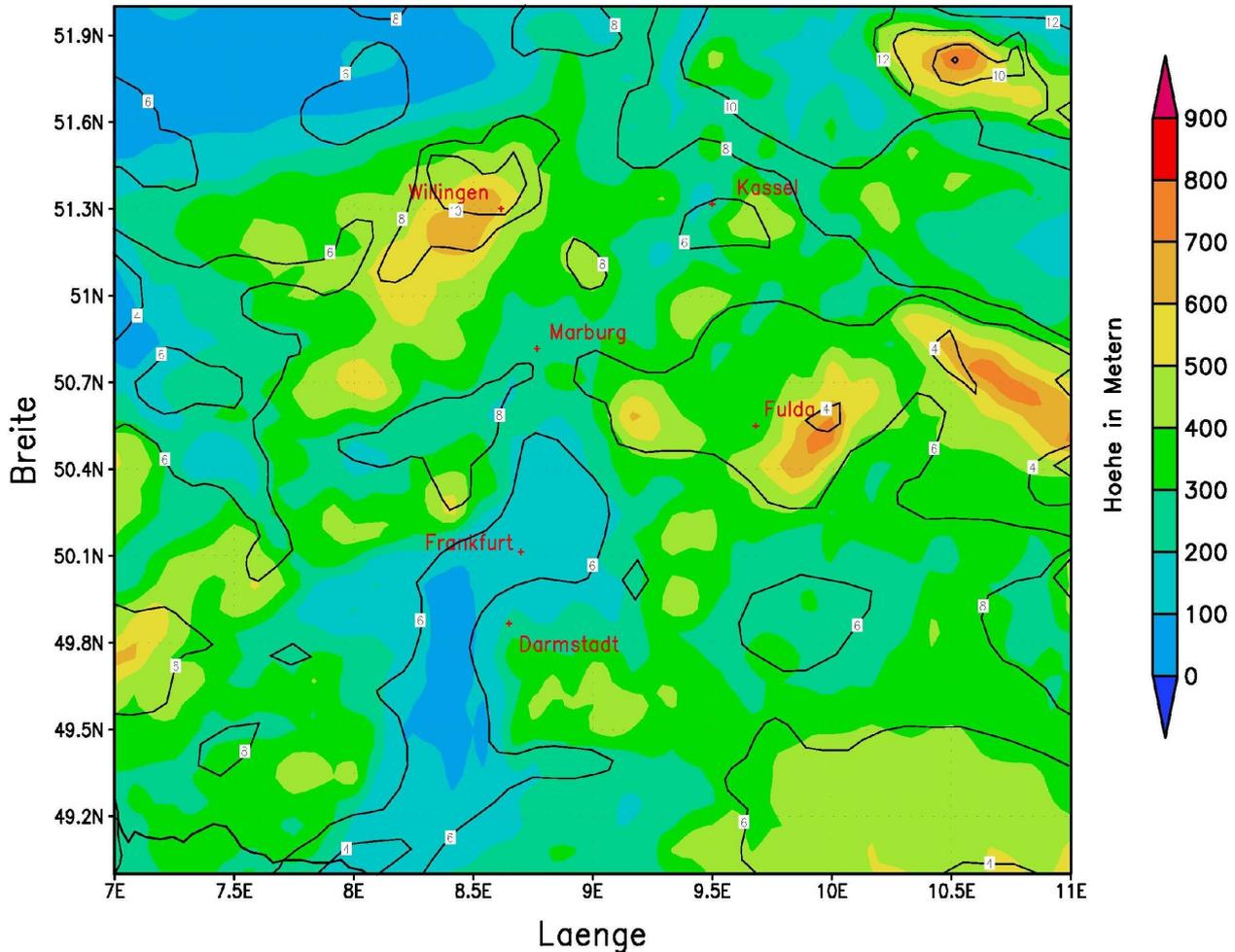


Abb. 5: Differenz zwischen der Projektion der Erstblüte Apfel als Mittelwert der Periode 2031-2060 mittels der REMO-Daten des Szenarios A1B und den beobachteten Daten aus der Periode 1958-2001. Die Isophänen sind Linien mit gleichem Blühdatum (Tag des Jahres), die Farben stellen die Höhe über NN dar.

Es muss jedoch noch weiterhin untersucht werden, ob dies so interpretiert werden kann, dass die mittleren Berglagen am deutlichsten von den Klimaänderungen im Sinne einer früher beginnenden Vegetationszeit "profitieren". Denn leider sind die mittleren und hohen Berglagen aufgrund der geringen Stationsdichte und Flächenanteile vergleichsweise schlecht determiniert, was die phänologischen Daten betrifft.

Mit den WETTREG-Daten wurde ebenfalls versucht, phänologische Modelle zu betreiben. Verwendet wurde das Szenario A2 (Jahre 2031-2060). Die Versuche zeigten, dass sich mit diesen Daten schwieriger zu interpretierende Iso-phänenkarten und generell schlechtere Prognoseergebnisse ergeben (Abb. 6).

Modell G (WETTREG, A2)

Erstbluete Apfel (Mittel 2031–2060)

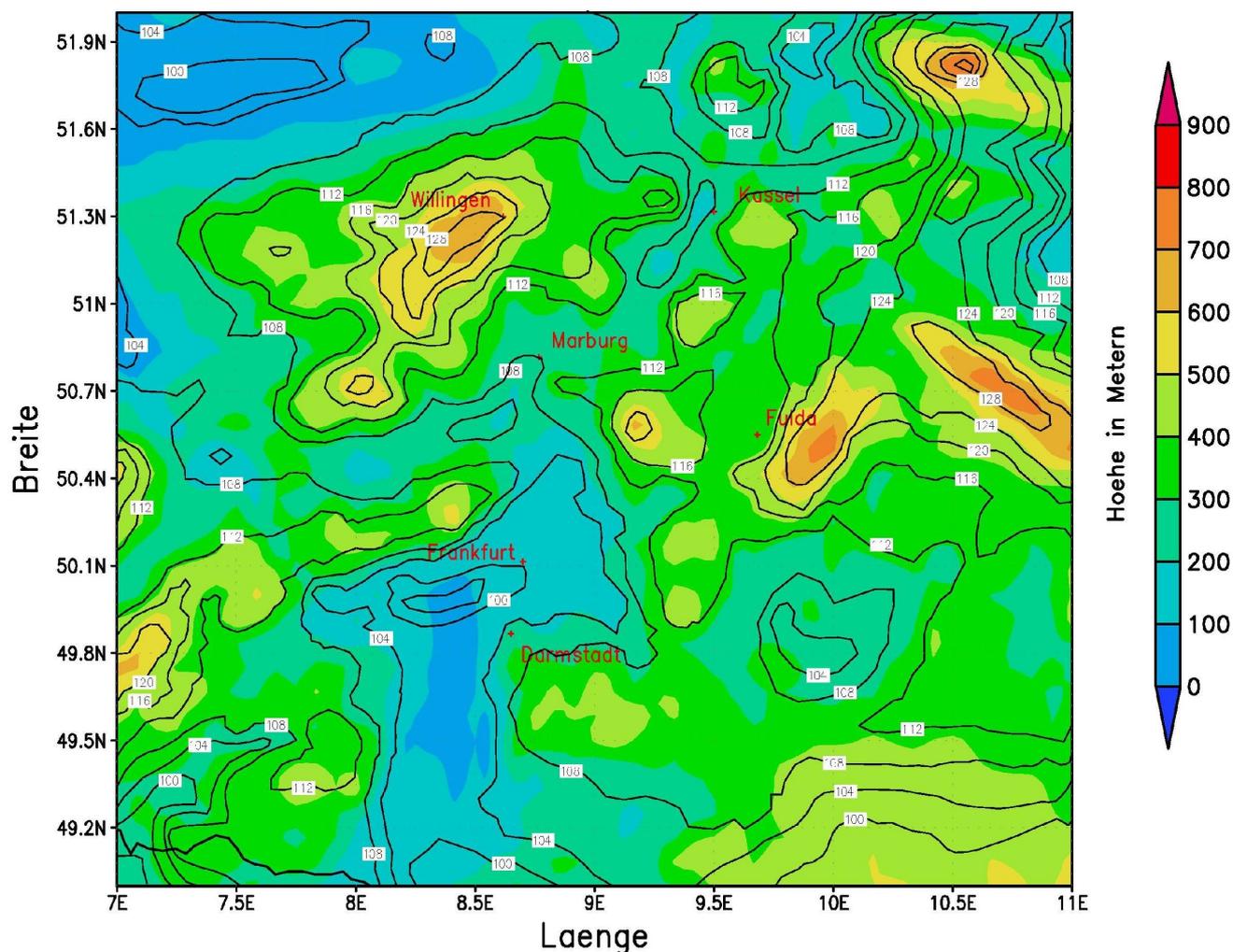


Abb. 6: Projektion der Erstblüte Apfel als Mittelwert der Periode 2031-2060 mittels der WETTREG-Daten des Szenarios A2. Die Isophänen sind Linien mit gleichem Blühdatum (Tag des Jahres), die Farben stellen die Höhe über NN dar.

So sind z.B. im Frankfurter Raum in sich unlogische starke regionale Unterschiede zu sehen oder im Nordosten eine mit der Gelände- und Höhenstruktur nicht vereinbare Isophänenkarte. Grundsätzlich wurden z.B. im Hessischen Ried vergleichbare Daten für den Blühbeginn wie in der Projektion mit den REMO-Daten festgestellt. Weitere Vergleiche waren nicht möglich, da in den WETTREG-Karten zu viele Inkonsistenzen festzustellen waren.

Die Gründe dafür sind prinzipiell die gleichen wie bei den REMO-Daten, d.h. die Interpolation führt zum Varianzverlust. Ob die etwas komplexere Interpolation der stationsbezogenen WETTREG-Daten auf das Gitter oder ein ggf. mit interpolierter Stationskontext für die schlechteren Ergebnisse verantwortlich sind, ist noch unklar. Die Stationen sind unregelmäßig im Vorhersagegebiet verteilt und oft weit voneinander entfernt, was die Interpolation schwieriger und komplexer macht. Hohe Entfernungen zwischen den Stationen können weiterhin dazu führen, dass die Gegebenheiten einer einzelnen Station

mit sehr spezifischen lokalen Eigenschaften auf zu viele Gridpunkte in der Umgebung übertragen werden.

Die bei den REMO-Daten beschriebene Problematik der Glättung der Temperaturdaten gilt ebenso für die CLM-Daten. Daher wurde auf eine Berechnung dieser Projektionen verzichtet.

5.1. Spätfröste

Die Projektion der phänologischen Entwicklung an Hand der Klimadaten erlaubt auch eine Abschätzung des Risikos von Spätfrösten in der Zeit der Blüte. In Abb. 7 ist für einige Gitterpunkte exemplarisch dargestellt, wie sich die Häufigkeiten verändern. Es zeigt sich, dass die Problematik der interpolierten Daten (d.h. die Verringerung der Häufigkeit von Extremtemperaturen) zu einer gegenüber den Stationsdaten etwa halbierten Häufigkeit von Spätfrösten sowohl bei der Berechnung der vergangenen Zeit (interpoliert aus den ERA-40-Daten) als auch für die Zukunftsprojektion 2031-2060 führt. Dies ist durch die Interpolation der REMO-Daten auf das Grid des phänologischen Modells begründet.

Frosttage in den 12 Tagen nach Bluehbeginn Apfel

10-Jahres Mittel ERA40 (58-01) vs. REMO (31-60)

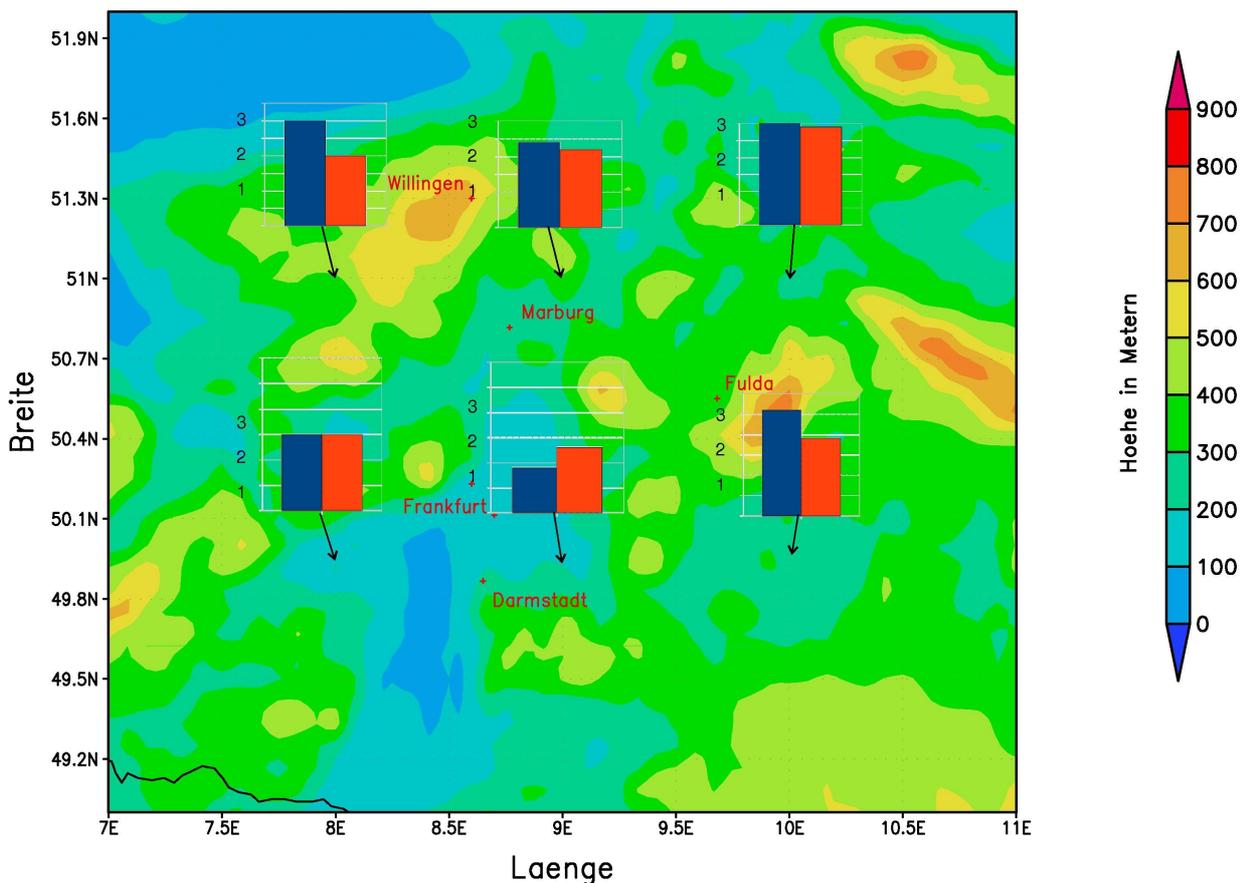


Abb. 7: Häufigkeiten des Auftretens von Frosttagen im 10-Jahres-Mittel. Vergleich des Durchschnitts der Perioden 1958-2001 (blauer Balken) und 2031-2060 (roter Balken). Die Farben der Geländekarte stellen die Höhe über NN dar.

Dass keine großen Unterschiede in der Anzahl Frosttage zwischen der Vergangenheit und der Zukunftsprojektion festgestellt werden können, ist mit großer Vorsicht zu betrachten. Zum einen müssten eigentlich auch in Abb. 7 (wie auch bei Abb. 5) die historischen Temperaturdaten von REMO (anstelle von ERA-40) genommen werden. Zum anderen ist nicht quantifizierbar, welche Unsicherheit die Glättung der Daten durch die verwendeten Interpolationstechniken bedingt.

6. Ausblick

Im Laufe der Bearbeitung wurde offensichtlich, dass phänologische Modelle nicht ohne eine varianzerhaltende Interpolation der antreibenden Temperaturdaten betrieben werden sollten. Dies ist insbesondere wichtig für die phänologischen Modelle, für die die Randwerte der Häufigkeitsverteilung der Temperaturen bedeutsamer sind als die zentralen Werte. Die Problematik sollte jedoch auch bei anderen Modellen auftauchen (agrar-meteorologische Modelle, Schneedeckenmodellierung etc.). Es gibt Verfahren zur varianzerhaltenden Interpolation von Daten. Methoden der Kombination dieser Verfahren (die z.B. statt Einzelwerten für den Zielpunkt dann Häufigkeitsverteilungen ausgeben) mit phänologischen Modellen müssen jedoch erst entwickelt werden.

Auch müssten zumindest die Temperaturdaten für die Vergangenheit, d.h. zum Erstellen des Modells in einer höheren räumlichen Auflösung vorliegen. ERA-40-Daten mit einer räumlichen Auflösung von 139 km sind einfach zu grob. Zurzeit ist aber ein europaweites Konsortium dabei, eine Reanalyse mit einer deutlich verbesserten räumlichen und zeitlichen Auflösung zu planen.

Es ist auch absehbar, dass Verbesserungen im Einsatz der phänologischen Modelle nicht mit Temperaturdaten alleine erreicht werden können. So weisen viele phänologische Zeitreihen markante Sprünge um 1990 auf, die durch den Temperaturverlauf alleine nur unzureichend erklärt werden können. Hier sind Erfahrungen mit komplexeren Modellen abzuwarten, die weitere meteorologische Parameter einbeziehen. Wichtig sind wahrscheinlich Bodentemperaturen und Daten der solaren Strahlung (direkte thermische Wirkung und photokybernetische Wirkungen). Hier kann möglicherweise ein Erklärungsfortschritt erzielt werden, da Anfang der 1990er Jahre mit dem Zusammenbruch der Industrie in Osteuropa, insbesondere auch in den Grenzgebieten zu Hessen, sich starke Änderungen in der Luftverschmutzung ergeben haben, die die Strahlungsintensität verändert haben.

7. Literatur

Chuine, I., 2000: A Unified Model for Budburst of Trees, *J. theor. Biol.* 207: 337-347

Hense, A. et al., 2002: Spatial modelling of phenological observations to analyse their interannual variations in Germany. *Agric. Forest Meteorol.* 112: 161-178

Hense, A. and Müller, M., 2007: Geostatistische Modellierung und Qualitätskontrolle von phänologischen Beobachtungen. *Promet*, Jahrg. 33, Nr. 1/2: 7-13

Meier, U., 1997: Entwicklungsstadien von Pflanzen – BBCH Monograph. Blackwell Wissenschaftsverlag Berlin Wien. 622pp.

Richardson, E.A., Seeley, S.D. and Walker, D.R., 1974: A model for estimating the completion of rest for “Redhaven” and “Elberta” Peach Trees. Hort Sci. 9: 331-332