

F.-M. CHMIELEWSKI, K. BLÜMEL

4 Klimawandel und Obstbau

Climate Change and Fruit Growing

Zusammenfassung

Der Klimawandel birgt für den Obstanbau sowohl Chancen als auch Risiken. Die Chancen liegen vor allem darin, dass durch die verlängerte Vegetationsperiode und die höheren Temperaturen in allen Jahreszeiten zunehmend wärmeliebende Arten als auch Sorten mit einer längeren Reifezeit in Deutschland angebaut werden können. Von höheren atmosphärischen CO₂-Gehalten könnten gerade Obstgehölze profitieren, die ausreichend mit Wasser und Nährstoffen versorgt werden. Allerdings könnte Trockenheit während der Sommermonate den Bewässerungsbedarf erhöhen. Zu den Risiken, und damit zum Gegenstand der Forschung, zählen Veränderungen im winterlichen Kältereiz für die Gehölze (Dormanzbrechung), die Gefahr von Spätfrostschäden infolge einer früheren Baumblüte, zunehmender Schädlingsdruck unter wärmeren Bedingungen sowie die Gefahr der Ausbreitung bekannter und neuer Pflanzenkrankheiten. Veränderungen der klimatischen Bedingungen können zudem ertragsbeeinflussend sein.

Abstract

Climate change includes both, opportunities and risks for fruit growing. The opportunities lie in the fact that due to the extended growing season length and higher temperatures in all seasons, heat-loving species and varieties with a longer maturity period can be increasingly grown in Germany. Just fruit trees, which are usually sufficiently supplied with water and nutrients, could benefit from the higher atmospheric CO₂-concentrations. However, drought during the summer months could increase the irrigation demand. The risks, and thus the subject of the research, include changes in the cold stimulus for the trees during winter (release of dormancy), the danger of late frost damage as a result of an earlier beginning of fruit tree blossom, and the increase of known and new pests and diseases under warmer conditions. Climate change can also affect the fruit yield.

1 Einleitung

Obwohl der Obstbau nur einen geringen Anteil an der landwirtschaftlichen Nutzfläche in Deutschland einnimmt, wird in nahezu jedem Bundesland Obst angebaut. Zum Baumobst zählen Obstarten wie Apfel, Birne, Pflaume/Zwetschge, Süßkirsche, Sauerkirsche, Mirabelle/Reneklode, Aprikose und Pfirsich. Der Apfel ist mit einem Anteil von 85,3 %, die wichtigste Obstart in Deutschland (STATISTISCHES JAHRBUCH 2010). Mit großem Abstand werden Pflaumen/Zwetschgen (5,7 %), Birnen (4,0 %) Süß- (2,7 %) und Sauerkirschen (2,3 %) kultiviert. Den Schwerpunkt des Obstbaus in Deutschland hinsichtlich der Anbaufläche bildet Baden-Württemberg (31,6 %) gefolgt von Niedersachsen (18,6 %), Rheinland-Pfalz (8,9 %) und Sachsen (8,6 %).

Im Vergleich zum Pflanzenbau, wo Möglichkeiten zur Anpassung an Klimaänderungen relativ schnell greifen können, sind bei der Anlage und Umgestaltung von Obstplantagen längerfristige Aspekte, wie klimatische Veränderungen, von vornherein zu berücksichtigen. Immerhin beträgt die Nutzungsdauer von Obstplantagen 25 bis 30

Jahre, und der Höchstertrag beim Baumobst stellt sich erst nach etwa 7 bis 10 Jahren ein. Die Anpassung des Obstbaus an Klimatrends benötigt daher Zeit und längerfristige Investitionen. Zudem sind die Obstanbaugebiete stark regional begrenzt und auf klimatisch sowie topographisch begünstigte Gebiete beschränkt (Abb. 4-1). Dies erhöht generell die Sensitivität des Obstbaus gegenüber klimatischen Veränderungen.

Im Vergleich zu landwirtschaftlichen Kulturarten befinden sich Untersuchungen zu den Auswirkungen von Klimaschwankungen und -änderungen auf den Obstbau noch in den Anfängen.

Eine der ersten Untersuchungen wurde an der Michigan State University (MSU) im Rahmen des Projektes „Pileus“ (2005-2007) durchgeführt. Obwohl das Gesamtziel dieses Projekts wesentlich weiter gefasst war, wurden in diesem Forschungsvorhaben erste Untersuchungen zu den Auswirkungen von Klimaschwankungen und -änderungen auf den Anbau von Sauerkirschen in Michigan durchgeführt (WINKLER et al. 2002, ZAVALLONI 2006). Nahezu zeitgleich (2006-2009) wurden im Rahmen des Projektes „KliO“

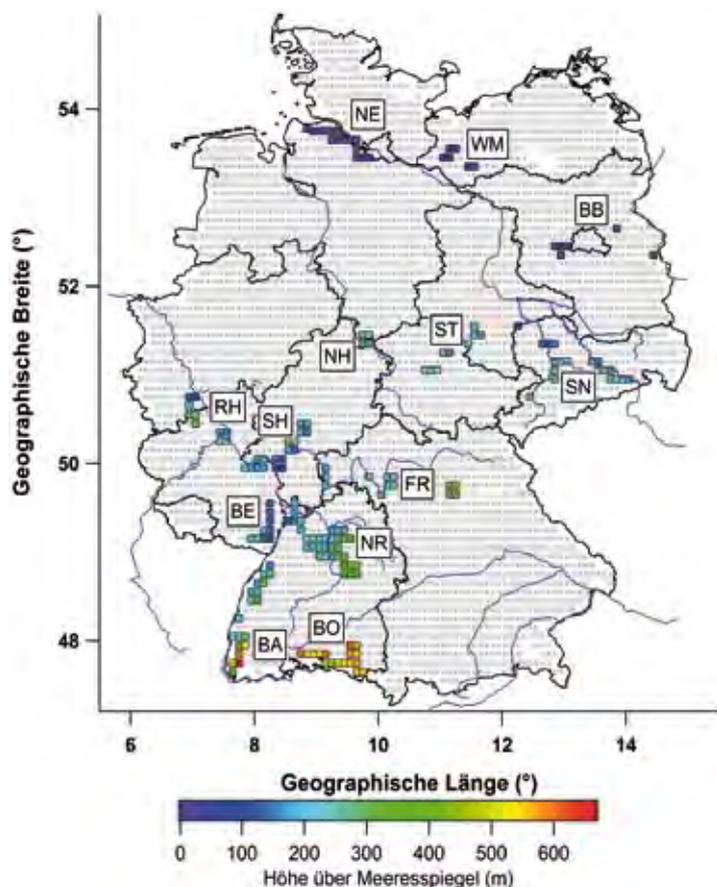


Abb. 4-1: Hauptanbaugebiete für Baumobst in Deutschland. NE: Niederelbe, WM: West-Mecklenburg, BB: Havelland/Brandenburg, ST: Süßer See/Thüringen, SN: Elbtal/Sachsen, RH: Rheinland/Rheinhessen, NH: Nordhessen, SH: Südhessen, FR: Franken, BE: Bergstraße, NR: Nekarregion, BA: Baden, BO: Bodenseegebiet.

erstmalig die Chancen und Risiken des Klimawandels für den Obstbau in Deutschland analysiert (CHMIELEWSKI et al. 2009a, 2009b). Die hier vorgenommenen Abschätzungen zu den klimabedingten Schäden im Apfelanbau und den möglichen Kosten des Klimawandels basierten auf verschiedenen Impact-Modellansätzen (phänologische Modelle, Wasserhaushaltsmodelle, Ertragsmodelle, Schaderregermodelle) und Regionalisierungen des ECHAM5/OM-Modelllaufes (WETTREG, REMO-UBA, Treibhausgas-Emissionsszenarien B1 und A1B). Spätere Untersuchungen zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Landwirtschaft in Washington (USA), die neben annuellen Kulturarten auch den Apfelanbau betrachtet haben, kamen zu sehr ähnlichen Resultaten wie in KliO (STÖCKLE 2010).

Das Projekt CLIMARK (2010-2014), das von der MSU koordiniert wird, ist

nunmehr auf den Sauerkirschanbau in den USA (Michigan) und in Europa (Deutschland, Polen, Ukraine, Ungarn) ausgerichtet. Dieses Projekt geht weit über den Rahmen herkömmlicher Impactstudien hinaus und untersucht zusätzlich Aspekte des Klimawandels auf nationale und internationale Handelsbeziehungen (WINKLER et al. 2010). Die in KliO begonnenen Studien für Deutschland werden ebenfalls auf regionaler Ebene fortgeführt und vertieft (INKLIM-A Hessen, CHARIKO 2010-2014). Hierbei werden die bereits in KliO entwickelten Ansätze methodisch weiter verbessert und auf den Obstanbau in Hessen angewandt. In den nachfolgenden Abschnitten wird auf einige methodische Aspekte bei den Untersuchungen zu den Auswirkungen des Klimawandels auf den Obstbau eingegangen.

2 Mögliche Folgen von Klimaänderungen im Obstbau

Klimatische Veränderungen in den Obstbauregionen können sowohl positive als auch negative Folgen für den Anbau von Baumobst haben. Bereits heute sind die ersten Folgen rezenter Klimaänderungen im Obstbau erkennbar. Sichtbare Anzeichen sind Verschiebungen in der Vegetationsentwicklung, wie ein vielfach beschriebener früherer Blühbeginn der Obstgehölze in Deutschland (CHMIELEWSKI et al. 2004, ESTRELLA et al. 2007, HENNIGES et al. 2007, BLANKE und KUNZ 2009). Vor allem zeitig blühende Obstarten, wie Aprikose und Pfirsich, zeigen die stärkste Verfrühung im Blühbeginn (Tab. 4-1).

Zu den positiven Effekten des Klimawandels zählt gewiss die für die Zukunft angenommene Verlängerung der thermischen Vegetationszeit in Deutschland um mehr als einen Monat (CHMIELEWSKI et al. 2009b). Hierdurch können neue Sorten angebaut werden, die eine deutlich längere Reifezeit benötigen und bisher aufgrund der thermischen Verhältnisse nicht für den Anbau in Deutschland geeignet waren. Dieser Trend zu neuen Sorten ist bereits heute feststellbar. So wird seit einigen Jahren die wärmeliebende, neuseeländische Apfelsorte „Braeburn“ mit Erfolg an

| Obstart | x | Datum | s | T in 45 Jahren | Konfidenzintervall ± Tage |
|--------------|-----|--------|------|----------------|---------------------------|
| Apfel früh | 126 | 06.05. | 7,6 | -12,5** | 7,1 |
| Apfel spät | 129 | 09.05. | 8,6 | -12,9* | 8,2 |
| Aprikose | 106 | 16.04. | 12,4 | -17,2** | 12,0 |
| Birne | 120 | 30.04. | 10,1 | -13,7** | 7,3 |
| Pfirsich | 111 | 21.04. | 11,5 | -15,7** | 7,7 |
| Pflaume | 117 | 27.04. | 10,4 | -14,1** | 10,2 |
| Sauerkirsche | 121 | 01.05. | 7,1 | - 9,5** | 6,9 |
| Süßkirsche | 115 | 25.04. | 7,7 | - 9,5* | 7,6 |

Tab. 4-1: Mittlere Eintrittstermine und Trends im Blühbeginn von Obstgehölzen in ganz Deutschland (x: mittlerer Eintrittstermin in Tagen nach Jahresbeginn, Datum, s: Standardabweichung der Jahreswerte, T: Trend 1961-2005 mit 95 %-Konfidenzintervall in Tagen, Signifikanz des Trends mit *: p < 5 %, **: p < 1 %, ***p < 0,1 %.

der Niederelbe angebaut und vermarktet. Diese Apfelsorte rangiert schon heute an sechster Stelle im Apfelsortiment der Niederelbe (GÖRGENS 2007). Weitere, spätreifende Sorten wie „Fuji“, „Pink Lady“ und „Granny Smith“ könnten somit im Zuge des Klimawandels auch in Deutschland an Bedeutung gewinnen.

2.1 Erfüllung des winterlichen Kältereizes

Äpfel können in fast allen gemäßigten Klimazonen der Welt erfolgreich angebaut werden. Hierfür gibt es Züchtungen und Unterlagen, die sich für die meisten Regionen eignen. Um den Winter unbeschadet zu überstehen, müssen die Bäume im Herbst in einen Ruhezustand gelangen, um nicht zu erfrieren bzw. nicht vor Winterende auszutreiben. Die Winterruhe (Dormanz) kann nach LANG et al. (1987) in drei Stadien eingeteilt werden, die Para-, Endo- und Ökodormanz, die durch verschiedenen Faktoren in der Pflanze selbst (Dominanz der Triebe, Phytohormone, Enzyme, etc.) und durch die Umwelt (Tageslänge, Lufttemperatur, Spektralverschiebung der Lichtes, etc.) induziert und letztendlich auch wieder aufgehoben werden. Hierbei wird angenommen, dass zur Überwindung der Endodormanz (eigentliche Winterruhe) ein sorten- beziehungsweise artenspezifisches Kältebedürfnis („chilling requirement“, C^*) erforderlich ist, dem die Gehölze ausgesetzt sein müssen. Diese Annahme ist vor dem Hintergrund der sehr komplexen, biochemischen Prozesse, beispielsweise in den Blütenknospen der Bäume, gewiss zu einfach, jedoch eine bisher weit verbreitete Theorie. Für Apfelbäume wird ein Kältebedürfnis von ungefähr 600 - 1800 Kältestunden („chilling hours“, CH) angenommen (unter anderen BALDOCCHI und WONG 2008). Zur Berechnung der „chilling hours“ werden stündliche Temperaturen verwendet, die in einem fest vorgegebenen Intervall liegen müssen (siehe Gleichung 2). Es gibt heutzutage auch einige neuere Apfelsorten, die an ausgesprochen milde Winter angepasst sind und dementsprechend ein Kältebedürfnis von unter 600 CH besitzen. Solche Sorten wie „Beverly Hills“, „Gordon“, „Tropical Beauty“ werden beispielsweise im südlichen Kalifornien und in Florida angebaut (ANDERSEN und CROCKER 2009). In solchen Regionen ist die Frage, ob die winterlichen Bedingungen ausgereicht haben, dass Kältebedürfnis der Gehölze zu befriedigen, ein alljährliches Problem. Somit ist in tropischen Gebieten unserer Erde der Anbau von Obst aus den gemäßigten Breiten ohne weitergehende Behandlung meist nicht möglich, da die Temperaturen in diesen Regionen nicht mehr den für die Gehölze erforderlichen Kältereiz erfüllen.

Ein unzureichender winterlicher Kältereiz kann einen verspäteten und ungleichmäßigen Beginn der Baumbüte nach sich ziehen. Ebenso kann ein längerer Blühzeitraum, mit verstärktem Knospenabwurf, die Folge sein (EREZ 2000, LEGAVE et al. 1982). Dies kann dann im Verlauf des Jahres zu einer ungleichmäßigen Fruchtreife und damit zu ökonomischen Konsequenzen für die Obstbauern führen (COUVILLON 1995). In Frankreich wurde bereits

durch die deutlich ansteigenden Wintertemperaturen, das Absterben von Knospen und Blüten bei einigen Aprikosensorten beobachtet (SEGUIN et al. 2005).

Der in Zukunft zu erwartende deutliche Anstieg der Lufttemperatur, vor allem im Herbst und im Winter, könnte zum Ende dieses Jahrhunderts, selbst in den gemäßigten Breiten, zu Veränderungen im winterlichen Kältereiz führen. Dementsprechend wurden hierzu erste Untersuchungen in verschiedenen Regionen der Erde durchgeführt (SCHWARZ und HANES 2010, DARBYSHIR et al. 2011). Hierbei hat sich gezeigt, dass sich der in einigen subtropischen Gegenden zur Verfügung stehende Kältereiz bereits reduziert hat (BALDOCCHI und WONG 2008, LUEDELING et al. 2009b, 2009c). Für Deutschland konnte bisher keine signifikante Änderung der winterlichen Kältesumme zwischen 1950 und 2010 festgestellt werden (LUEDELING et al. 2009a). Untersuchungen von CHMIELEWSKI et al. (2012) lassen vermuten, dass selbst bis zum Ende dieses Jahrhunderts das Kältebedürfnis für die meisten Obstarten in Deutschland erfüllt sein wird, obwohl es künftig zu stärkeren regionalen Verschiebungen in der Beendigung der Winterruhe (Endodormanz) kommen kann. Das Ende der Gehölzruhe hängt sowohl vom Kältebedürfnis der Pflanze als auch von den klimatischen Bedingungen am Standort, vor allem zwischen Oktober und Februar ab. In diesem Zeitraum liegen die Temperaturen meist in einem Bereich, der zur Überwindung der Dormanz förderlich ist. Zur Beschreibung dieser Ruhephase werden sogenannte Kältestunden-Modelle verwendet, die auf der Grundlage von stündlichen Temperaturdaten (T_{ih}) rechnen. Der pflanzenspezifische Kältebedarf (C^*) wird hierbei in Kältestunden, Kälteeinheiten (chilling units, CU) bzw. Kälteportionen (chill portions, CP) angegeben. Die insgesamt bis zur Zeit (Tag) t akkumulierte Kältesumme $S_c(t)$ wird hierbei mit verschiedenen Modellansätzen $R_c(T_{ih})$ berechnet. Der notwendige Kältereiz C^* ist am Tag t_1 erfüllt, wenn $S_c(t)$ für $t=t_1$ zum ersten Mal gleich oder größer als C^* wird (Gleichung 1).

$$S_c(t) = \sum_{i=t_0}^t \sum_{h=1}^{24} R_c(T_{ih}), \text{ mit } S_c(t_1) \geq C^* \quad (1)$$

Der einfachste und relativ weit verbreitete Ansatz ist hierbei das Weinberger-Eggert Modell (WEINBERGER 1950), das zur Überwindung der Dormanz stündliche Kältereize (CH) mit Temperaturen im Bereich zwischen 0 und 7,2 °C aufsummiert.

$$R_c(T_{ih}) = \begin{cases} 1 \text{ CH, wenn } 0 < T_{ih} < 7.2 \text{ °C} \\ 0 \text{ CH, wenn } T_{ih} \leq 0 \text{ °C oder } T_{ih} \geq 7.2 \text{ °C} \end{cases} \quad (2)$$

Das Utah-Modell (RICHARDSON et al. 1974) ist etwas detaillierter, da es eine Wichtung der stündlichen Temperaturen, entsprechend ihres Einflusses auf die Freisetzung der Dormanz, vornimmt (UCU). Der Ansatz geht davon aus, dass vor allem Temperaturen zwischen 2,5 °C und < 9,2 °C (Gewicht = 1) hierfür effektiv sind. Hingegen können höhere Temperaturen ab 16 °C die akkumulierte Kältesumme wieder verringern.

$$R_c(T_{ih}) = \begin{cases} 0.0 \text{ UCU, wenn } T_{ih} < 1.5^\circ\text{C} \\ 0.5 \text{ UCU, wenn } 1.5^\circ\text{C} \leq T_{ih} < 2.5^\circ\text{C} \\ 1.0 \text{ UCU, wenn } 2.5^\circ\text{C} \leq T_{ih} < 9.2^\circ\text{C} \\ 0.5 \text{ UCU, wenn } 9.2^\circ\text{C} \leq T_{ih} < 12.5^\circ\text{C} \\ 0.0 \text{ UCU, wenn } 12.5^\circ\text{C} \leq T_{ih} < 16.0^\circ\text{C} \\ -0.5 \text{ UCU, wenn } 16.0^\circ\text{C} \leq T_{ih} < 18.0^\circ\text{C} \\ -1.0 \text{ UCU, wenn } T_{ih} \geq 18.0^\circ\text{C} \end{cases} \quad (3)$$

Eine Abwandlung des Utah-Modells stellt das Positiv-Utah Modell dar (LINSLEY-NOAKES et al. 1995), das den reduzierenden Einfluss von Temperaturen $\geq 16,0^\circ\text{C}$ auf die Aufhebung der winterlichen Ruhephase nicht berücksichtigt. Dieses Modell findet vor allem in subtropischen Regionen Anwendung.

Das wohl am stärksten pflanzenphysiologisch begründete Modell ist das Dynamische Modell (FISHMAN et al. 1987a, 1987b, EREZ und FISHMAN 1998), das auf weit komplexeren Annahmen als Gleichung (1) basiert. Dieses Modell berechnet sogenannte Kälteportionen (CP), die einfach gesagt erst dann irreversibel festgeschrieben werden, wenn die Pflanze über eine bestimmte Zeit förderlichen Temperaturen zur Überwindung der Dormanz ausgesetzt war. Höhere Temperaturen über einen längeren Zeitraum können diesen Vorgang verzögern, jedoch kurze warme Abschnitte ihn sogar beschleunigen. Optimale Temperaturen werden hier zwischen 6°C und 8°C angenommen. Diese Annahmen stammen weitestgehend aus

experimentellen Beobachtungen und sind in die Modellierung eingeflossen (FISHMANN 1987b).

Neben diesen vier Modellen existieren noch weitere Ansätze, auf die hier nicht weiter eingegangen wird. Allgemein kann man sagen, dass das Weinberger-Eggert-Modell ein sehr einfaches und bei den Obstbauern weit verbreitetes Modell ist. Neuere Untersuchungen kommen jedoch zu dem Schluss, dass das Modell vermutlich zu simpel ist, um die Winterruhe der Gehölze ausreichend beschreiben zu können (DARBYSHIR 2011, LUEDELING und BROWN 2011, CAMPOY et al. 2012). Hingegen wird oft das dynamische Modell als bestes und universell einsetzbares Modell angesehen (LUEDELING und BROWN 2011, DARBYSHIR et al. 2011).

Untersuchungen zum Modellverhalten unter sich verändernden klimatischen Bedingungen haben gezeigt, dass das Weinberger-Eggert-Modell, im Vergleich zu den drei anderen Modellansätzen, ein deutlich differierendes Verhalten aufweist (CHMIELEWSKI et al. 2012). Während das einfache CH-Modell für wärmere klimatische Verhältnissen in Deutschland (2071-2100, REMO-UBA, Szenario A1B) stets ein späteres Ende der Winterruhe berechnet, sind die Ergebnisse der anderen Modelle stark vom Kältebedürfnis der Gehölze (C^*) abhängig. Nach diesen drei Ansätzen würde sich für Kulturen mit einem geringen Kältebedarf (700-1100 h) das Ende der Dormanz im langjährigen Mittel leicht verspäten, sich für Arten mit einem

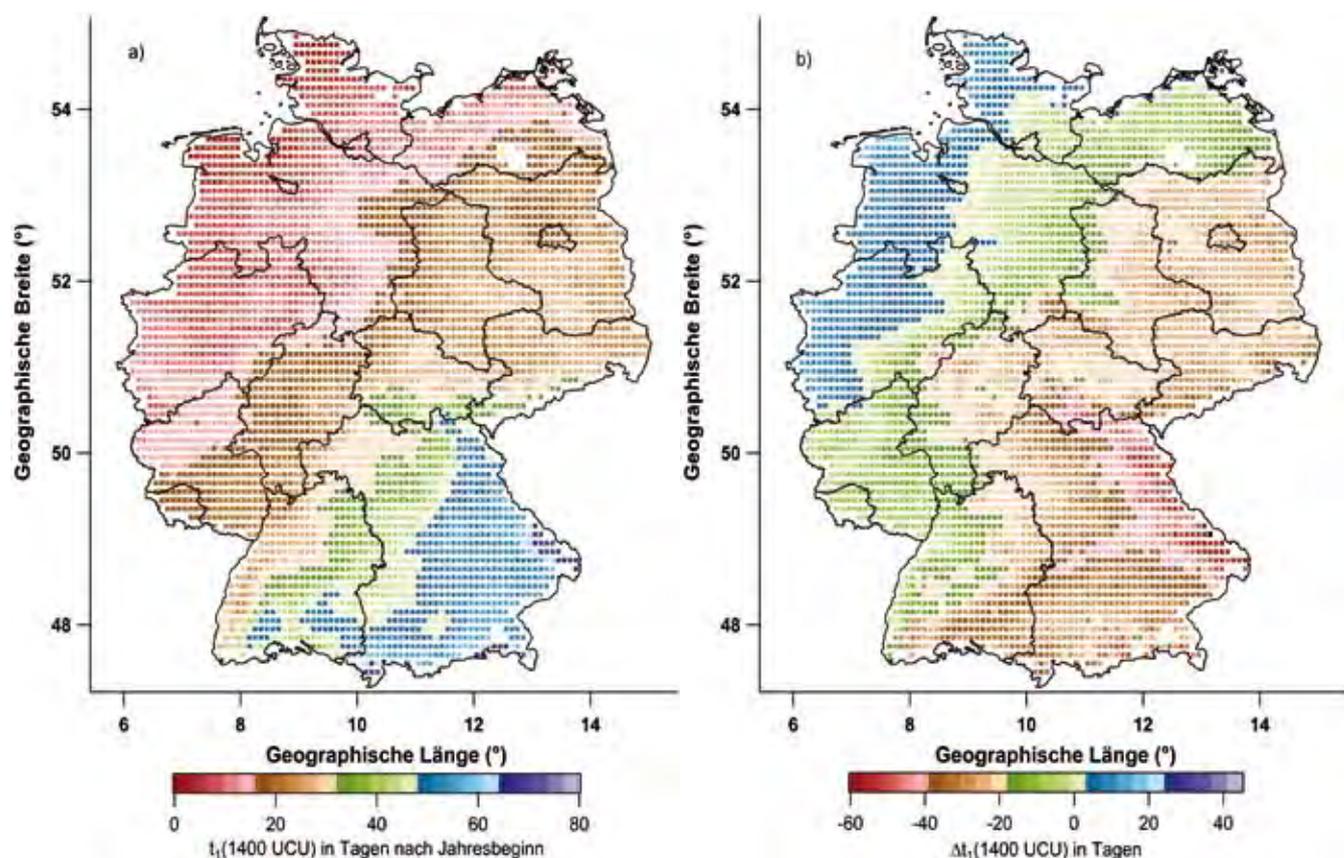


Abb. 4-2: (a) Mittleres Ende der Winterruhe (t_1) für Gehölze mit einem Kältebedürfnis von 1400 Kälteeinheiten (UCU: Kältestunden nach dem Utah-Modell) für heutige klimatische Bedingungen 1971-2000; (b) Mögliche Veränderungen dieses Terms (Δt_1) 2071-2100 (REMO-UBA, Szenario A1B) minus 1971-2000 (REMO-UBA, C20).

mittleren Bedarf (1200-1400 h) nur geringe Veränderungen ergeben und sich für Obstarten mit einem hohen Kältebedürfnis (1500-1800 h) das Ende der Winterruhe zunehmend verfrühen.

Abbildung 4-2 (a) zeigt, dass das Ende der Dormanz für einen Kältereiz von 1400 Stunden (Utah Modell) etwas früher in den maritimen, nordwestdeutschen Regionen (< 15 Tage nach Jahresbeginn, DOY) als in den winterlich kühleren, südöstlichen Gebieten (> 35 DOY) gebrochen wird. Somit ist ein klarer NW/SE-Gradient über Deutschland erkennbar. Abbildung 4-2 (b) veranschaulicht mögliche Änderungen dieses Termins zum Ende dieses Jahrhunderts im Vergleich zu heute. Interessant ist hierbei, dass bei einem Kältebedürfnis von 1400 UCU nur in einem schmalen Streifen im Nordwesten der Republik (u.a. auch Anbauregion NE in Abb. 4-1) mit einem späteren Ende der Winterruhe zu rechnen ist. Dies ist die Region, in der dieser Termin heutzutage zuerst erreicht wird, siehe Abb. 4-2 (a). In den gegenwärtig winterkalten, südöstlichen Gegenden, führt die künftige Erwärmung hingegen zu einer deutlichen Verfrüfung des Endes der Winterruhe, um maximal bis zu 60 Tagen. Diese Befunde zeigen in ähnlicher Weise auch das Positive Utah und das Dynamische Modell und sollten daher bei der Projektion phänologischer Entwicklungsstadien für künftige klimatische Verhältnisse berücksichtigt werden.

2.2 Spätfrostschäden

Zu den gefürchteten Witterungsschäden im Obstbau gehört seit jeher Spätfrost, der den Fruchtansatz an den Bäumen stark reduzieren kann. Im Zuge des Klimawandels können sich die Häufigkeit und die Stärke der Fröste, die sowohl durch nächtliche Ausstrahlung als auch durch advektive Prozesse entstehen können, ändern.

Nach dem außergewöhnlich milden Winter 2006/07 kam es im Frühjahr 2007 in vielen Ländern Osteuropas zu erheblichen Frostschäden mit starken Ertragseinbußen von teilweise über 50 % beim Apfel, wie in Ungarn, Polen, Tschechien, der Slowakei, sowie in Litauen und Lettland (ELLINGER und GÖRGENS 2007). Heftige Spätfrostere Anfang Mai 2011 führten auch vor allem im Süden Deutschlands zu Schäden am Wein. Hier waren zum Teil nicht nur die Blütenknospen, sondern auch die Triebspitzen erfroren. Zusätzlich kam es zu Frostschäden an Kirschen und Äpfeln, die bereits als kleine Früchte an den Bäumen hingen.

Untersuchungen zu Veränderungen in der Häufigkeit und Stärke von Frostschäden unter sich ändernden klimatischen Bedingungen sind daher von Bedeutung. Hierfür ist es zunächst wichtig zu wissen, wie sich der Blühbeginn der Gehölze künftig ändern wird, da die Obstbäume zur Zeit der Blüte und kurz danach ihre stärkste Empfindlichkeit gegenüber Frost aufweisen. Für solche Abschätzungen sind phänologische Modelle erforderlich, die sowohl für heutige als auch für künftige klimatische Verhältnisse verlässli-

che Ergebnisse liefern. Die oben gemachten Aussagen zu den regionalen Veränderungen im Ende der Winterruhe legen die Verwendung von gekoppelten „Chilling/Forcing“ (CF)-Modellen nahe (CHMIELEWSKI et al. 2011). Reine Forcing-Modelle, zu denen das bekannte „Growing Degree Day“ (GDD)-Modell gehört (Gleichung 4b), sind unter heutigen klimatischen Bedingungen durchaus verwendbar, zeigen jedoch große Schwächen bei der Projektion von Veränderungen in der Pflanzenentwicklung unter wärmeren Bedingungen.

$$S_f(t) = \sum_{i=t_1}^t R_f(T_i), \text{ wobei } S_f(t_2) \geq F^* \quad (4a)$$

$$R_f(T_i) = \max(0, T_i - T_{BF}) \quad (4b)$$

Das erste Problem besteht in der Wahl eines geeigneten Starttermins (t_1) für den Beginn der Temperatursummation. Ergibt sich für das optimale Modell ein relativ später Starttermin (zum Beispiel der 1. März), so ist das Modell nicht in der Lage, förderliche Temperaturen für die Entwicklung der Knospen zu berücksichtigen, die im Zuge des Klimawandels bereits im Januar oder Februar auftreten könnten. Eine Fixierung von t_1 auf einen früheren Termin, beispielsweise den 1. Januar, ist hierfür scheinbar die Lösung, vorausgesetzt, dass die Winterruhe zu diesem Zeitpunkt bereits beendet ist. Theoretische Untersuchungen von BLÜMEL und CHMIELEWSKI (2012a) haben jedoch deutlich gezeigt, dass der phänologische Trend eines solchen Forcing-Modells nicht mehr von der Wahl der Modellparameter (T_{BF} : Basistemperatur für die Temperatursumme, F^* : notwendige Temperatursumme bis zum Phaseneintritt) abhängt, sondern nur noch einem eigenen, modellinternen Verlauf folgt, der lediglich von dem vorgegebenen Temperaturanstieg im Frühjahr abhängt. Damit besitzt das Forcing-Modell keinen Wert mehr und berechnet einen viel zu starken phänologischen Trend für die Zukunft. Meist ist zudem die optimale Basistemperatur im Modell (T_{BF}) physiologisch nicht zu erklären (zum Beispiel $T_{BF} < 0 \text{ °C}$).

Um dennoch unter wärmeren klimatischen Bedingungen einen zeitgerechten Start der Forcing-Modelle zu ermöglichen (zum Beispiel 1. Januar), wurden das GDD-Modell um einen Tageslängenterm erweitert (Gleichung 5b). DL ist hierbei die Zeit in Stunden von Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang und $EXPO$ ein weiterer Modellparameter, der mit zu optimieren ist. Die akkumulierte Wärmesumme $S_f(t)$ in (5a) zusammen mit (5b) wird dann nicht wie in (4b) in GDD, sondern in Photo-Thermischen Einheiten (PTU) angegeben.

$$S_f(t) = \sum_{i=t_1}^t R_f(T_i), \text{ wobei } S_f(t_2) \geq F^* \quad (5a)$$

$$R_f(T_i) = \max(0, T_i - T_{BF}) \cdot \left(\frac{DL}{10h} \right)^{EXPO} \quad (5b)$$

Dieser neue Term widerspiegelt vermutlich zum einen die bei einigen Gehölzen nachgewiesene photoperiodische Reaktion (BASLER und KÖRNER 2012), führt aber in jedem

| | Beobachtung | REMO-UBA | ECHAM5 CLM | HadCM3 CLM | WETTREG Lauf 0 | WETTREG Lauf 1 | Modellmittel |
|-------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 1971-2000 | 119 (2,7) 29.04. | 120 (3,8) 30.04. | 120 (3,3) 30.04. | 120 (3,2) 30.04. | 120 (1,4) 30.04. | 120 (1,7) 30.04. | 120 (1,5) 30.04. |
| 2071-2100 | | 105 (3,4) 15.04. | 105 (2,7) 15.04. | 104 (3,6) 14.04. | 98 (1,6) 08.04. | 98 (2,2) 08.04. | 102 (4,4) 12.04. |
| Differenz | | -15 (5,0) | -15 (4,1) | -16 (4,7) | -22 (2,1) | -22 (2,8) | -18 (4,5) |
| p-Wert | | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,007 |
| Signifikanz | | *** | *** | *** | *** | *** | *** |

Tab. 4-2: Blühbeginn beim frühreifenden Apfel in Hessen (Mittelwert über die Obstbauregionen), berechnet mit dem gekoppelten Dynamischen Modell und dem modifizierten GDD-Modell (Gleichung 5). 30-jährige Mittelwerte (in DOY) mit einseitigem 95 %-Konfidenzintervall in Klammern (in Tagen) für 1971-2000 und 2071-2100 sowie Differenz beider Werte (in Tagen) und p-Wert (in %) zur H0: „Differenz gleich null“ und H1: „Differenz ungleich null“. Signifikanz: *: $p < 5\%$, **: $p < 1\%$, *** $p < 0,1\%$.

Fall zu einer realistischen Basistemperatur, auch wenn t_j im Modell auf den 1. Januar gesetzt wird. Der eigentliche Vorteil der Gleichung (5b) zeigt sich, wenn diese Forcing-Funktion mit den zuvor beschriebenen Kältestunden-Modellen kombiniert wird. Die Verwendung von Chilling-Modellen bietet sich gerade für Obstgehölze an, da sich in der Literatur Angaben zum Kältebedarf C^* von Obstarten und -sorten finden lassen. Die Kopplung von beispielsweise Gleichung (1) mit Gleichung (5) führt bei der Optimierung (Eichung) des Modells nicht nur zu einer realistischen Basistemperatur T_{BF} im Ansatz (5b), sondern auch zu einem realistischen Kältebedürfnis C^* der Obstart (siehe auch MATZNELLER et al. 2012).

Als Beispiel sei hier die mögliche Verschiebungen des Blühbeginns beim Apfel in Hessen für fünf regionale Klimaszenarien dargestellt (BLÜMEL und CHMIELEWSKI 2012b). Die Ergebnisse zeigen, dass sich der Blühbeginn des Apfels zum Ende dieses Jahrhunderts in den Obstbauregionen Hessens im Mittel signifikant um 18 Tage ($\pm 4,5$ d) verfrühen kann (Tab. 4-2).

Um eine Aussage zu den möglichen Veränderungen in der Spätfrostgefahr zu machen, ist zusätzlich noch das Blühende zu berechnen, um wenigstens drei frostsensitive Entwicklungszeiträume betrachten zu können (n Tage vor dem Blühbeginn, Blühbeginn bis Blühende, nach Blühende), in denen sich die Empfindlichkeit der Knospen, Blüten beziehungsweise Jungfrüchte gegenüber Frost leicht unterscheidet. Dementsprechend variiert auch der angenommene Schaden. Angaben hierzu findet man in der Literatur, zum Beispiel in RIEGER (2006).

Neben der Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Frost bestimmter Stärke in diesen Zeitabschnitten ist es von Interesse abzuschätzen, wie sich die Schäden an den Knospen oder Blüten künftig ändern könnten. Dieses Wissen ist wiederum erforderlich, um den späteren Ertragsverlust durch Frost berechnen zu können. Für diese Berechnungen kann man die Minimumtemperatur der Luft (T_n) verwenden, beziehungsweise besser das Minimum der Bestandstemperatur (T_{veg}), da dieses in klaren, windschwachen Strahlungsnächten wesentlich kleiner als T_n sein kann. In windigen und

bewölkten Nächten hingegen gleichen sich beide Temperaturen an. Die Berechnung der Bestandstemperatur ist generell nur mit aufwendigen SVAT-Modellen (*Soil-Vegetation-Atmosphere*) möglich, so dass man sich entweder auf die Minimumtemperatur beschränken muss, wobei der Blütenschaden dann vermutlich unterschätzt wird, oder approximativ die Feuchttemperatur (T_f) verwenden muss, die von den Obstbauern als Startzeitpunkt für die Frost-

schutzberegnung genutzt wird. Diese Temperatur stellt sich jedoch nur auf einer feuchten Blattoberfläche ein und nicht bei einem trockenen Bestand. In BLÜMEL und CHMIELEWSKI (2012b) wurde daher die Bestandstemperatur (T_{veg}) approximativ aus einer modifizierten Feuchttemperatur (T_{fm}) berechnet (Gleichung 6a), die nachfolgend noch mittels Windgeschwindigkeit (V_{10}) und Bedeckungsgrad (N) korrigiert wurde, da bei geringen Windgeschwindigkeiten T_{fm} im Vergleich zu T_{veg} immer noch zu hoch war. Dieses T_{fm}^* in Gleichung (6b) wurde zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit von Spätfrostschäden an der den Blüten verwendet.

$$T_{fm} = \left[T - \frac{1}{\gamma} \cdot (E(T_{fm}) - e) \cdot \frac{r_H(V_{10})}{r_H(V_{10}) + r_s} \right] \quad (6a)$$

$$T_{fm}^* = T_{fm} - \left[\frac{1 \text{ K} \cdot \text{ms}^{-1}}{V_{10} + 1 \text{ ms}^{-1}} \cdot (1 - N) \right] \quad (6b)$$

T : Lufttemperatur; γ : Psychrometernkonstante; E : Sättigungsdampfdruck; e : Dampfdruck; r_H : aerodynamischer Widerstand für Wärmeleitung, der von der Windgeschwindigkeit V_{10} abhängt; r_s : Bulk-Stomatawiderstand

Tabelle 4-3 zeigt die berechneten Wahrscheinlichkeit für Frostschäden bestimmter Stärke für jeweils 30-jährige Zeiträume für heutige (Beobachtung, C20) und für künftige Klimaverhältnisse im Mittel über fünf regionale Klimamodelle. Hierbei zeigt sich, dass für heutige klimatische Bedingungen lediglich leichte Frostschäden mit bis 10 % Ertragsverlust in einer nennenswerten Anzahl und Häufigkeit (etwa 40 %) auftreten. Fröste, die zu stärkeren Schäden beim Apfel führen, das heißt zu Mindererträgen zwischen 10 % und 50 % oder sogar zwischen 50 % und 100 %, sind relativ selten und treten im Durchschnitt nur etwa alle 14 Jahre auf. An diesen Verhältnissen wird sich vermutlich auch zum Ende dieses Jahrhunderts in den Obstbaugebieten Hessens nichts ändern. Dieses Ergebnis dürfte zunächst für die Obstbauern erfreulich sein, ist jedoch auch für andere Obstarten und Anbauregionen zu prüfen.

| | Frostschaden > 0 % - 10 % | Frostschaden > 10 % - 50 % | Frostschaden > 50 % - 100 % |
|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| Beobachtung (1971-2000) | 44,1 (11,1) | 7,6 (4,7) | 7,0 (7,0) |
| Modellmittel C20 (1971-2000) | 38,4 (6,8) | 3,8 (1,8) | 2,7 (4,4) |
| Modellmittel A1B (2071-2100) | 30,1 (10,9) | 3,6 (3,3) | 2,9 (3,0) |
| Differenz | -8,4 (12,4) | -0,1 (3,7) | 0,1 (5,0) |
| p-Wert | 17,34 | 93,33 | 95,62 |
| Signifikanz | n.s. | n.s. | n.s. |

Tab. 4-3: Wahrscheinlichkeiten für leichte, mittlere und starke Frostschäden beim frühreifenden Apfel in den Obstbauregionen Hessens, im Zeitraum 10 Tage vor Blühbeginn bis 31. Juli. 30-jährige Mittelwerte mit einseitigem 95%-Konfidenzintervall in Klammern (in %) für 1971-2000 und 2071-2100 sowie Differenz beider Werte (in %) und p-Wert (in %) zur H0: „Differenz gleich null“ und H1: „Differenz ungleich null“, n.s.: nicht signifikante Änderung.

2.3 Schädlinge und Krankheiten im Obstbau

Das Auftreten von Pflanzenschädlingen und -krankheiten wird ebenfalls durch den Witterungsverlauf und das Klima beeinflusst. Schadinsekten sind poikilotherm (wechselwarm), wodurch ihre Entwicklung maßgeblich durch die Temperatur gesteuert wird. Ihr vermehrtes Erscheinen würde zu Ertragseinbußen führen, wenn keine adäquate Bekämpfung durchgeführt wird, die dem veränderten zeitlichen Auftreten und der Intensität der Schädlinge angepasst ist.

Ein gefürchteter Schädling im Apfelanbau ist der Apfelwickler (*Cydia pomonella*), dessen Maden sich in die Äpfel einbohren und damit die Früchte für Tafelobst unbrauchbar machen. Seine Entwicklung ist primär temperaturabhängig, wodurch sich mit steigender Temperatur der Befallsdruck erhöhen kann. Beobachtungen des Apfelwicklers im nördlichsten Obstanbaugebiet Deutschlands, der Niederelbe, deuten auf das Auftreten einer partiellen zweiten Generation dieses Schädlings in wärmeren Jahren wie 2006, 2008 und 2010 hin (WEBER und GÖRGENS 2009). Demzufolge ist es auch bei uns vorstellbar, dass sich künftig im Jahresverlauf eine komplette zweite beziehungsweise sogar dritte Generation dieses Schädlings ausbilden kann, wie es in Südfrankreich oder in den warmen Gebieten der USA heute schon der Fall ist.

Die Bekämpfung des Apfelwicklers gehört bereits heute zur obstbaulichen Praxis, denn die Mindereinnahmen bei einem Fruchtbefall durch die Made des Apfelwicklers belaufen sich immerhin auf 2/3 gegenüber nicht geschädigtem Tafelobst. Eine Nichtbekämpfung dieses Schädlings würde zudem im Folgejahr den Schaden erhöhen, so dass auch bei geringem Befall Pflanzenschutzmaßnahmen sinnvoll sind. Erste Abschätzungen mit dem Apfelwickler-Modell (RIMpro-Cydia, WEBER und GÖRGENS 2009) haben gezeigt, dass sich in allen Obstbauregionen Deutschlands die Bedingungen für diesen Schädling verbessern, so dass künftig mit mehr als einer Generation im Jahr gerechnet werden muss (CHMIELEWSKI et al. 2009b). Gegenstand der Forschung ist gegenwärtig die weitere Verbesserung und Validierung des Modells.

Wichtige Pflanzenkrankheiten beim Apfel sind bakterielle Erkrankungen wie Feuerbrand oder Pilzkrankheiten wie Apfelschorf, Mehltau und Fruchtfäule. Es ist äußerst schwierig, die Auswirkungen des Klimawandels auf die komplexen Beziehungen zwischen Krankheitserregern (Pathogene wie Bakterien, Viren, Pilze),

Überträgern (Insekten) und der Pflanze selbst abzuschätzen (SCHERM 2004). Die Ausbreitung von Pflanzenkrankheiten wird häufig durch feucht-warme Witterungsschnitte begünstigt. Der Pilz *Diplodia seriata*, Verursacher der Schwarzen Sommerfäule an Äpfeln, ist ein neuer Pathogen an der Niederelbe, der vermutlich vermehrt in Jahren mit hohen Temperaturen und häufigen Regenschauern während der Vegetationszeit auftritt (WEBER 2009). In Frankreich, Nordamerika und Südafrika ist dieser Pilz schon seit längerem als Fruchtfäule-Erreger bekannt, der ungewöhnlich hohe Temperaturen für die Blatt- und Fruchtfäule benötigt (GESCHE und WEBER 2008). LADÁNYI et al. (2010) stellten fest, dass Niederschlag während der Kirschblüte die Ausbreitung von bakteriellen und pilzlichen Krankheiten allgemein fördert. Ein künftig erhöhter Befallsdruck wird ebenfalls einen umfassenden und zeitlich angepassten Pflanzenschutz erforderlich machen.

2.4 Klimawandel und Obstertrag

Obwohl man seit vielen Jahrzehnten versucht, den Witterungseinfluss auf den Obstertrag zu untersuchen, beispielsweise auf Äpfel in verschiedenen Regionen Deutschlands (unter anderen ZIELKE 1929, HOLTHUSEN 2010), existiert bis heute kein komplexes Ertragsmodell für Baumobstkulturen. Dies liegt unter anderem daran, dass die Ertragsbildung beim Obst von einer Vielzahl von Faktoren abhängt, die zum Teil nichtklimatischen Ursprungs sind. Zu diesen Parametern zählt beispielsweise die Sorten- und Unterlagenwahl, der Pflanzabstand, die Baumerziehung (Höhe und Form der Bäume) und nicht zuletzt das Alter der Bäume. Allein diese Faktoren machen eine meteorologische Ertragsanalyse, wie sie von landwirtschaftlichen Kulturen bekannt ist, äußerst schwer. Unter dem Eindruck des Klimawandels und der vergleichsweise deutlich langsameren Anpassungsmöglichkeiten bei mehrjährigen Kulturen erscheint es jedoch notwendig, die Wirkung klimatischer Parameter intensiver zu untersuchen (HOLTHUSEN und CHMIELEWSKI 2011).

Anstelle von mechanistischen Modellen werden daher vorerst für die Ertragsberechnung beim Obst Ertragsfunktionen („Yield-Functions“) verwendet. Nach HANDSCHACK (2000) hängt die Ertragsbildung beim

Apfel unter anderem vom Vorjahresertrag, der Alternanz, der zur Blüte gelangten Knospen, dem Fruchtansatz und dem Einzelfruchtgewicht ab.

Untersuchungen von HOLTHUSEN (2010) haben gezeigt, dass sich, nach einer gewissenhaften Aufbereitung der Ertragsdaten, ein Teil der jährlichen Varianz von Apfelträgen an der Niederelbe durch Witterungsgrößen erklären lässt. ZAVALLONI et al. (2008) hatten im Rahmen des Pileus-Projekts ebenfalls eine Ertragsfunktion zur Schätzung von Sauerkirscherträgen entwickelt. Die jährliche Variabilität der Kirscherträge (Sorte „Montmorency“) konnte hierbei maßgeblich durch den Niederschlag in einem Zeitraum von 30 Tagen vor dem Beginn der ersten Herbstfröste im Vorjahr, die prozentuale Anzahl der fruchtbaren Blüten, ebenfalls unter Berücksichtigung von Blütenschäden durch Spätfrost im Folgejahr und der Anzahl feuchter Tage während der Bestäubung beschrieben werden ($R^2=0,68$ für die interne Modellvalidierung).

Zur Untersuchung von möglichen Veränderungen des Apfeltrages im Projekt KliO wurde ein Wasserhaushalts- und Ertragsmodell für landwirtschaftliche Nutzpflanzen (SIMWASER, STENITZER 1988) modifiziert, um auch Rechnungen für Dauerkulturen durchführen zu können. Hierzu wurde in das Modell ein Vollertragsapfelbaum (Sorte „Elstar“ beziehungsweise „Jonagold“) mit konstantem Alter (unveränderte jährliche Startwerte für die Pflanzenparameter im Modell) implementiert. Mit diesem einfachen Ansatz war es möglich, erste klimabedingte Veränderungen des Apfeltrages auf der Grundlage von Änderungen in der Frischmasse abzuschätzen. Weitere ertragsbeeinflussende Parameter konnten noch nicht implementiert werden. Ebenso war es bisher nicht möglich, den CO_2 -Düungeeffekt in dem Modell zu berücksichtigen, der gerade bei Obstbäumen, die keinem Wasser- und Nährstoffmangel unterliegen, relevant sein kann (JANSSENS et al. 2000), wenngleich es nur wenige Untersuchungen hierzu gibt (AINWORTH und LONG 2005).

Die mit SIMWASER durchgeführten Modellrechnungen ergaben bis zum Ende des 21. Jahrhunderts (2071-2100) einen leichten Rückgang der Apfelträge in Deutschland, der insbesondere auf die signifikante Verkürzung der Reifephase um bis zu 20 Tage im Mittel (WETTREG 2006, Szenario A1B) zurückzuführen war (CHMIELEWSKI et al. 2009b). Beobachtungen in der Neckarregion belegen die Tendenz zu einer Verkürzung der Reifephase, beispielsweise beim „Golden Delicious“, durch eine stärkere Verfrühung des Erntebeginns (-23 Tage, 1962-2007) gegenüber dem Blühbeginn (-11 Tage). Hierdurch ergeben sich einerseits neue Vermarktungsmöglichkeiten (RUESS 2009), andererseits könnte sich dies, bei einer weiteren Verkürzung der Reifephase, im Apfeltrag widerspiegeln. Um in diesem Punkt verlässliche Aussagen treffen zu können, ist die Entwicklung von Ertragsmodellen für Obstarten in Zukunft unerlässlich.

3 Fazit

Man kann mit Sicherheit davon ausgehen, dass Untersuchungen zu den Auswirkungen von Klimaschwankungen und Klimaänderungen auf Dauerkulturen und insbesondere auf Obstgehölze in den kommenden Jahrzehnten weiterhin Gegenstand vieler Studien auf nationaler und internationaler Ebene sein werden. Sowohl in der methodischen Herangehensweise, als auch in der Entwicklung verlässlicher Impaktmodelle ist noch viel Arbeit zu leisten. Die hier vorgestellten Methoden und Ansätze sind ein erster Versuch, sich dieser durchaus schwierigen Problematik zu nähern. Gegenwärtig liegt der größte Wert solcher Studien vor allem in der Entwicklung von geeigneten Methoden zur Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels im Obstbau. Die Ergebnisse der regionalen Klimamodelle sind bereits eine gute Grundlage für solche Testrechnungen. Jedoch sind in den RCMs nicht alle Größen in gleicher Weise zuverlässig. Vor allem die Variabilität einzelner Modellvariablen, wie beispielsweise die Minimumtemperatur der Luft, die für die Beurteilung der Veränderung von Spätfrostschäden benötigt wird, ist von Modell zu Modell sehr unterschiedlich, was teilweise zu sehr differierenden Aussagen führt. Dies betrifft leider auch bereits die Verteilung der Modellvariablen im Kontrolllauf. Somit haben derzeit noch methodische Aspekte wie die Entwicklung und Validierung von Impaktmodellen den Vorrang gegenüber einer dezidierten Berechnung von Ertragsschäden auf der Grundlage von Klimaszenarien.

Literatur

- AINSWORTH, E.A., LONG, S.P., 2005: What have we learned from 15 years of free-air CO_2 enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO_2 . *New Phytol.* **165**, 351-372.
- ANDERSEN, P.C., CROCKER, T.E., 2009: Low chill apple cultivars for North Florida and North central Florida. HS764, Univ. Florida, IFAS Extension, 10 p.
- BALDOCCHI, D., WONG, S., 2008: Accumulated winter chill is decreasing in the fruit growing regions of California. *Climate Change* **87**, 153-166.
- BASLER, D., KÖRNER, C., 2012: Photoperiodic sensitivity of bud burst in 14 temperate forest tree species. *Agricultural and Forest Meteorology* **165**, 73-81.
- BLANKE M., KUNZ, A., 2009: Einfluss rezenter Klimaveränderungen auf die Phänologie bei Kernobst am Standort Klein-Altendorf - anhand 50-jähriger Aufzeichnungen. *Erwerbs-Obstbau* **5**, DOI 10.1007/s10341-009-0086-3.
- BLÜMEL, K., CHMIELEWSKI, F.-M., 2012a: Shortcomings of classical phenological forcing models and a way to overcome them. *Agricultural and Forest Meteorology* **164**, 10-19. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrfor.2012.05.001>.
- BLÜMEL, K., CHMIELEWSKI, F.-M., 2012b: Klimawandel in Hessen – Chancen, Risiken und Kosten für

- den Obst- und Weinbau. Jahresbericht, *Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie* (HLUG), 218 S. http://www.agrar.hu-berlin.de/agrarmet/forschung/fp/CHARIKO_html, letzter Zugriff 2012.
- CAMPOY, J.A., RUIZ, D., ALLDERMAN, L., COOK, N., EGEE, J., 2012: The fulfilment of chilling requirements and the adaptation of apricot (*Prunus armeniaca* L.) in warm winter climates: An approach in Murcia (Spain) and the Western Cape (South Africa). *Europ. J. Agronomy* **37**, 43-55.
- CHMIELEWSKI, F.-M., BLÜMEL, K., HENNIGES, Y., BLANKE, M., WEBER, R.W.S., ZOTH, M., 2011: Phenological Models for the Beginning of Apple Blossom in Germany. *Meteorologische Zeitschrift* **20**, 5, 487-496.
- CHMIELEWSKI, F.-M., BLÜMEL, K., PÁLEŠOVÁ, I., 2012: Climate change and possible shifts of dormancy release for deciduous fruit crops in Germany. *Climate Research* **54**, 209-219, <http://dx.doi.org/10.3354/cr01115>.
- CHMIELEWSKI, F.-M., BLÜMEL, K., HENNIGES, Y., MÜLLER A., 2009a: Klimawandel und Obstbau in Deutschland. Endbericht des BMBF-Verbundprojekts KliO. Eigenverlag, *Humboldt-Universität zu Berlin*, 237 S., http://www.agrar.hu-berlin.de/agrarmet/forschung/fp/KliO_html, letzter Zugriff 2012.
- CHMIELEWSKI, F.-M., BLÜMEL, K., HENNIGES, Y., MÜLLER, A., WEBER, R.W.S., 2009b: Climate Change: Chances, Risks, and Costs for the German Fruit Growing Sector (in German). In: Mahammadzadeh, M., H. Biebeler, H. Bardt, (Eds.): *Climate Protection and Adaptation to Climate Impacts – Strategies, Measurements, Examples. Institute of German Economy Cologne, Media GmbH*, 279-286.
- CHMIELEWSKI, F.-M., MÜLLER, A., BRUNS, E., 2004: Climate changes and trends in phenology of fruit trees and field crops in Germany, 1961-2000. *Agricultural and Forest Meteorology*, **121**, 69-78.
- COUVILLON G.A., 1995: Temperature and Stress Effects on rest in Fruit Trees: A Review. *Acta Horticulture* **395**, 11-19.
- DARBYSHIRE R., WEBB, L., GOODWINC, I., BARLOWA, S., 2011: Winter chilling trends for deciduous fruit trees in Australia. *Agricultural and Forest Meteorology* **151**, 1074-1085
- ELLINGER, W., GÖRGENS, M., 2007: EU-Kernobstschätzung 2007. *Mitteilungen des OVR* **62**, 9, 320-327.
- EREZ, A., 2000: Bud dormancy; phenomenon, problems and solutions in the tropics and subtropics. In: Erez, A. (Ed.): *Temperate Fruit Crops in Warm Climates. Kluwer Academic Publishers*, The Netherlands, 17-48.
- EREZ, A., FISHMAN, S., 1998: The dynamic model for chilling evaluation in peach buds. Proc. Fourth Intern Peach Symp., *Acta Hort.*, 507-510
- ESTRELLA N., SPARKS, T., MENZEL, A., 2007: Trends and temperature response in the phenology of crops in Germany. *Global Change Biology* **13**, 1737-1747.
- FISHMAN, S., EREZ, A., COUVILLON, G.A., 1987a: The temperature-dependence of dormancy breaking in plants - mathematical analysis of a 2-step model involving a cooperative transition. *J. Theor. Biol.* **124**, 473-483.
- FISHMAN, S., EREZ, A., COUVILLON, G.A., 1987b: The temperature-dependence of dormancy breaking in plants - computer simulation of processes studied under controlled temperatures. *J. Theor. Biol.* **126**, 309-321.
- GESCHE Q., WEBER, R.W.S., 2008: Aktuelles zur Infektionsbiologie von *Diplodia seriata* an Äpfeln im Niederelbegebiet. *Mitteilungen des OVR* **63**, 11, 373-308.
- GÖRGENS, M., 2007: Baumobsterhebung 2007 II. Ergebnisse für das Niederelbegebiet. *Mitteilungen des OVR* **62**, 11, 411-414.
- HANDSCHACK, M., 2000: Sieben Komponenten der Ertragsbildung, Ertragsschwankungen und ihre Ursachen, Bekämpfung der Alternanz. In: FRIEDRICH, G., FISCHER, M. (Hrsg.): *Physiologische Grundlagen des Obstbaues*. 3. Aufl. Stuttgart (Hohenheim), *Ulmer*, 210-227.
- HENNIGES, Y., VOLLMER, I., WEBER, R.W.S., GÖRGENS, M., CHMIELEWSKI, F.-M., 2007: Der Klimawandel, eine Herausforderung für den norddeutschen Obstbau. In: *Mitteilungen des Obstbauversuchsrings des Alten Landes* **62**, Nr. 5, 156-160.
- HOLTHUSEN, H.H.F., 2010: Climate Change and Apple Yield - Influence of Weather and Climate on Yield Formation. Master Thesis, Humboldt-Universität zu Berlin, 162 S.
- HOLTHUSEN, H.H.F., CHMIELEWSKI, F.-M., 2011: Klimawandel und Apfelertrag - Einfluss von Witterung und Klima auf die Ertragsbildung an der Niederelbe. *DGG-Proceedings* **1**, 3, 1-5, DOI: 10.5288/dgg-pr-01-03-hh-2011.
- JANSSENS, I.A., MOUSSEAU, M., CEULEMANS, M.R., 2000: Crop Ecosystem Response to Climatic Change, Tree Crops. In: Reddy, K.R., H.F. Hodges (Ed.): *Climate Change and Global Crop Productivity. CABI Publishing*, New York, USA, 245-270.
- LANG, G.A., EARLY, J.D., MARTIN, G.C., DARNELL, R.L., 1987: Endodormancy, paradormancy, and ecodormancy-physiological terminology and classification for dormancy research. *HortScience* **22**, 371-377.
- LADÁNYI, M., PERSELY, S.Z., SZABÓ, T., SZABÓ, Z., SOLTÉSZ, M., NYÉKI, J., 2010: Climatic indicator analysis of blooming time for sour cherries. *International Journal of Horticultural Science* **16**, 11-16.
- LEGAVE, J.M., GARCIA, M., MARCO, F., 1982: Some descriptive aspects of drops process of flower buds or young flowers on apricot in south of France. *Acta Horticulture* **121**, 75-83.
- LINSLEY-NOAKES, G.C., LOUW, M., ALLAN, P., 1995: Estimating daily Positive Utah Chill Units using daily minimum and maximum temperatures. *Journal of the South African Society of Horticultural Science* **5**, 19-23.
- LUEDLING, E., BLANKE, M., GEBAUER, J., 2009a: Auswirkungen des Klimawandels auf die Verfügbarkeit von Kältewirkungen (Chilling) für Obstgehölze in Deutschland. *Erwerbs-Obstbau* **51**, 81-94.
- LUEDLING, E., BROWN, P.H., 2011: A global analysis of the comparability of winter chill models for fruit and nut trees. *Int. J. Biometeorol.* **55**, 411-421.

- LUEDELING E., GEBAUER, J., BUERKERT, A., 2009b: Climate change effects on winter chill for tree crops with chilling requirements on the Arabian Peninsula. *Climate Change* **96**, 219-237.
- LUEDELING E., ZHANG, M., GIRVETZ, E.H., 2009c: Climatic changes lead to declining winter chill for fruit and nut trees in California during 1950-2009. *PLoS ONE* **4**(7), e6166.
- MATZNELLER, P., BLÜMEL, K., CHMIELEWSKI, F.-M., 2012: Models for the beginning of sour cherry blossom. Submitted to *Int. J. Biometeorol.*
- RICHARDSON, E.A., SEELEY, S.D., WALKER, D.R., 1974: A model for estimating the completion of rest for "Redhaven" and "Elberta" peach trees. *HortScience* **1**, 331-332.
- RIEGER, M., 2006: Introduction to fruit crops. *Haworth Press*, New York, 462 p.
- RUESS, F., 2009: Austrieb, Blüte und Erntebedingungen von „Golden Delicious“. Auswirkungen der Klimaveränderungen auf die Phänologie in der mittleren Neckarregion. *Obstbau* **2**, 76-78.
- SCHERM, H., 2004: Climate change, can we predict the impacts on plant pathology and pest management? *Can. J. Plant Pathol.* **26**, 267-273.
- SCHWARTZ M.D., HANES, J.M., 2010: Continental-scale phenology: warming and chilling. *Int. J. Climatol.* **30**, 1598-1599.
- SEGUIN, B., N. BRISSON, J. M. LEGAVE, DE I.G. COR-TAZAR, 2005: Adaptation of horticulture and viticulture to climate change in France. In: *NFJ Report* **1**, 3, p. 23.
- STATISTISCHES JAHRBUCH 2010: Statistisches Jahrbuch 2010 für die Bundesrepublik Deutschland. *Statistisches Bundesamt*, Wiesbaden, 745 S.
- STENITZER, E., 1988: SIMWASER – Ein numerisches Modell zur Simulation des Bodenwasserhaushaltes und des Pflanzenertrages eines Standortes, *Mitteilungen aus der Bundesanstalt für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt*, Petzenkirchen, Nummer **31**.
- STÖCKLE, C.O., NELSON, R.L., HIGGINS, S., BRUNNER, J., GROVE, G., BOYDSTON, R., WHITING, M., KRUGER, C., 2010: Assessment of climate change impact on Eastern Washington agriculture. *Climatic Change* **102**, 77-102.
- WEINBERGER, J.H., 1950: Chilling requirements of peach varieties. *Proc. Am. Soc. Hortic. Sci.* **56**, 122-128.
- WINKLER, J.A., ANDRESEN, J.A., GUENTCHEV, G., KRIEGEL, R.D., 2002: Possible impacts of projected climate change on specialized agriculture in the Great Lakes Region. *Journal of Great Lakes Research* **28**, 608-625.
- WINKLER, J.A., THORNSBURY, S., ARTAVIO, M., CHMIELEWSKI, F.-M., KIR-SCHKE, D., LEE, S., LISZEWSKA, M., LOVERIDGE, S., TAN, P.-N., ZHONG, S., ANDRESEN, J.A., BLACK, J.R., KURLUS, R., NIZALOV, D., OLYNK, N., USTRNUL, Z., ZAVALLONI, C., BISANZ, J.M., BUJDOSÓ, G., FUSINA, L., HENNIGES, Y., HILSENDEGEN, P., LAR, K., MALARZEWSKI, L., MOELLER, T., MURMYLO, R., NIEDZWIEDZ, T., NIZALOVA, O., PRAWIRANATA, H., ROTHWELL, N., VAN RAVENSWAY, J., VON WITZKE, H., WOODS, M., 2010: Multi-regional climate change assessments for international market systems with longterm investments: A conceptual framework. *Climatic Change* **103**, 445-470.
- WEBER, R.W.S., 2009: Possible impacts of climate change on harmful fungi in orchards. The examples of fruit rot pathogens on apples (in German). *Erwerbs-Obstbau* **51**, 115-120.
- WEBER, R.W.S., Görgens, M., 2009: Klimawandel und Obstbau in Deutschland. *Endbericht des BMBF-Verbundprojekts KliO*, Jork, 52 S.
- ZAVALLONI, ANDRESEN, C.J.A., WINKLER, J.A., FLORE, J.A., BLACK, J.R., BEEDY, T.L., 2006: The Pileus Project: Climatic impacts on sour cherry production in the Great Lakes Region in past and projected future time frames. *Acta Horticulturae (ISHS)* **707**, 101-108.
- ZAVALLONI, C., ANDRESEN, J.A., BLACK, J.R., WINKLER, J.A., GUENTCHEV, G., PIROMSOPA, K., POLLYEA, A., BISANZ, J.M., 2008: A Preliminary Analysis of the Impacts of Past and Projected Future Climate on Sour Cherry Production in the Great Lakes Region of the USA, Proc. VIIIth IS on Modelling in Fruit Research. *Acta Hort.* **803**, 123-130.
- ZIELKE, W., 1929: Untersuchungen über den Einfluss der Witterung auf die Ernten einiger Obstgattungen und -sorten in Deutschland. In: *Gartenbauwissenschaft* **2**, 5/6, 459-589.