

FOLGEN DES KLIMAWANDELS FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT

Frank-Michael Chmielewski, Berlin

1. Einleitung

Land- und Forstwirtschaft sind seit jeher klimasensitive Wirtschaftszweige, die sich an die klimatischen Gegebenheiten und den Verlauf des Wetters und der Witterung, einschließlich extremer Ereignisse, anpassen müssen. Ein Beispiel für den Einfluss des Klimas auf die Landwirtschaft ist die weitgehend klimatisch bestimmte Abgrenzung von Anbauzonen.

Land- und Forstwirtschaft bestimmen aber auch über die Abgabe und Aufnahme von Spurengasen die weitere Entwicklung des Klimas mit. Als Produzent von Spurengasen tritt die Landwirtschaft vor allem beim Methan und bei den Stickoxiden auf. Weltweit beträgt die Freisetzung (Emission) klimarelevanter Spurengase aus der Landwirtschaft 15%. Die Spurengasemissionen infolge der Vernichtung tropischer Regenwälder liegen ebenfalls in dieser Größenordnung.

In Deutschland werden nahezu 80% der Fläche (357.092,90 km²) durch Land- und Forstwirtschaft genutzt. Die *Landwirtschaft* ist hier die flächenmäßig bedeutendste Landnutzungsform. Etwa die Hälfte der Landesfläche (0,17 Mio. km² = 17 Mio. ha) wird von der Landwirtschaft bearbeitet. Hiervon entfallen ca. 11,8 Mio. ha auf den Anbau landwirtschaftlicher Nutzpflanzen und ca. 5 Mio. ha auf Dauergrünland. Weitere Produktionsrichtungen sind Obst-, Wein- und Zierpflanzenbau, mit einem Flächenanteil von ca. 0,2 Mio. ha.

Deutschland zählt zu den wichtigsten Agrarproduzenten



Foto: CHM

der Europäischen Union. Mehr als die Hälfte der Ackerfläche wird für den Anbau von Getreide einschließlich Körnermais genutzt. Neben der Pflanzenproduktion ist die Tierhaltung eine weitere wichtige Produktionsrichtung.

Ein Drittel unseres Landes (0,11 Mio. km² = 11 Mio. ha) ist mit Wald bedeckt. *Wälder* sind von großer Bedeutung zur Produktion von Holz, zur Verbesserung der Luft und des Klimas, als Lebensstätte für eine vielfältige Flora und Fauna und nicht zuletzt als Erholungsraum für den Menschen. Zudem sind Wälder wichtigste Kohlenstoffspeicher der terrestrischen Biosphäre.

2. Das Klima als Standortfaktor

Zu den wichtigsten Standortfaktoren zählen das Klima und der Boden (Abb. 1). Das *Klima* ist ein maßgeblicher Faktor für die Verbreitungsgrenze der natürlichen Vegetation (Bäume, Sträucher, Gräser) und für die Anbaueignung und -form landwirtschaftlicher Nutzpflanzen. Besonders über den Wasserhaushalt (Niederschlag, Verdunstung, Bodenwassergehalt) sind Klima und Boden eng miteinander verknüpft.

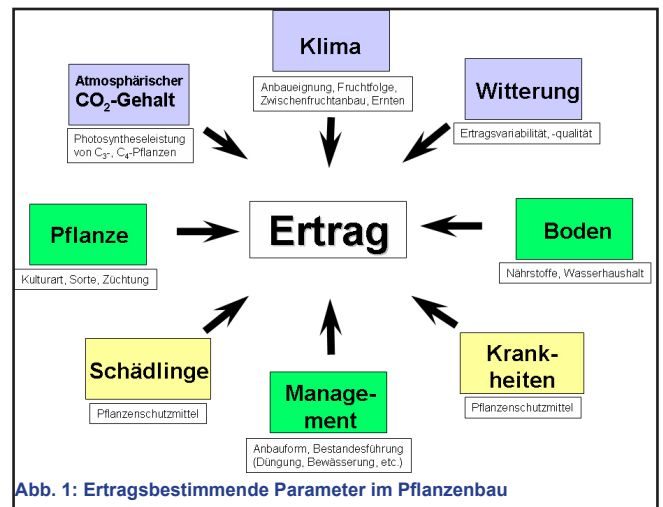


Abb. 1: Ertragsbestimmende Parameter im Pflanzenbau

Klimatische Standortfaktoren haben Einfluss auf das Wachstums-, Entwicklungs- und Reproduktionsvermögen der Pflanzen und damit auf ihr Ertragspotential. Die Variabilität des *Wetters* und der *Witterung* hingegen spiegelt sich in dem jährlich erzielten Zuwachs an Biomasse bzw. im Ertrag landwirtschaftlicher Kulturen wider.

Verändert sich unser Klima, so ändern sich auch die Standortbedingungen und damit die Wachstums- und Entwicklungsbedingungen für heute regional

etablierte Pflanzengesellschaften und Kulturarten. Je nach Art und Weise der klimatischen Veränderungen können sich die Bedingungen für das Wachstum, die Entwicklung und die Reproduktion von Pflanzenarten verbessern oder verschlechtern. Hierdurch werden zwangsläufig die Ertragshöhe, -stabilität und -qualität der Kulturarten beeinflusst. In diesem Zusammenhang müssen sowohl die direkten Wirkungen eines höheren CO_2 -Gehalts der Atmosphäre als auch die indirekten Wirkungen betrachtet werden, die sich aus den geänderten Klimaverhältnissen ergeben. Bereits heute sind Wirkungen jüngster (rezenter) Klimaänderungen auf die Biosphäre zu erkennen.

Es ist daher von außerordentlichem Interesse, möglichst frühzeitig Erkenntnis darüber zu haben, wie sich unser Klima infolge menschlicher Eingriffe ändern wird. Hierauf aufbauend können Anpassungsstrategien entwickelt werden, die uns helfen, negative Auswirkungen des Klimawandels auf die Land- und Forstwirtschaft abzumildern bzw. zu verhindern.

Zu den maßgeblichen Umweltveränderungen zählen hier solche

- im atmosphärischen CO_2 -Gehalt,
- in der thermischen Vegetationsperiode,
- in der Pflanzenentwicklung,
- im Bodenwasserhaushalt und
- im Auftreten von extremen Wetterlagen und Witterungsereignissen.

3. Der CO_2 -Düngungseffekt

Pflanzen produzieren das organische Material, aus dem sie zur Hauptsache bestehen (Kohlenhydrate), selbst. Dieser Prozess heißt Photosynthese, wofür die Pflanzen CO_2 , Licht, Wasser und Nährstoffe benötigen.

Der atmosphärische CO_2 -Gehalt ist seit Beginn der Industrialisierung von etwa 280 ppm auf gegenwärtig über 380 ppm angestiegen. Experimente unter kontrollierten Bedingungen haben gezeigt, dass bei optimaler Licht-, Nährstoff- und Wasserversorgung durch die Erhöhung des CO_2 -Gehalts der Luft der Ertrag noch gesteigert werden kann (sog. CO_2 -Düngungseffekt).

Dieser optimistische Befund lässt sich leider nicht so einfach in die praktische Landwirtschaft übertragen, da hierbei eine Vielzahl positiver und negativer Wechselwirkungen mit ins Spiel kommt.

Zunächst spielt die Pflanzenart eine bedeutende Rolle. Landwirtschaftliche Kulturpflanzen sind entweder vom C_3 - (u.a. Getreide der mittleren Breiten, Hackfrüchte, Gräser) oder vom C_4 -Typ (u.a. Mais, Hirse, Zuckerrohr). C_4 -Pflanzen haben vor der eigentlichen Photosynthese einen Prozess geschaltet, in dem

das CO_2 in den Pflanzenzellen konzentriert wird. Sie sind deshalb unabhängiger von den CO_2 -Gehalten der Atmosphäre als C_3 -Pflanzen. Da dieser Prozess aber zusätzliche Strahlungsenergie benötigt, finden sich die meisten C_4 -Pflanzen unter natürlichen Bedingungen in wärmeren Gegenden der Erde. Es ergeben sich die in Abb. 2 dargestellten Abhängigkeiten zwischen CO_2 -Konzentration und Produktivität. Während bei C_3 -Pflanzen die Produktion bis zu CO_2 -Konzentrationen von 800 ppm noch erhöht wird, hat dies bei C_4 -Pflanzen keine Auswirkungen mehr. C_3 -Pflanzen werden somit stärker von den höheren CO_2 -Gehalten der Luft profitieren als C_4 -Pflanzen.

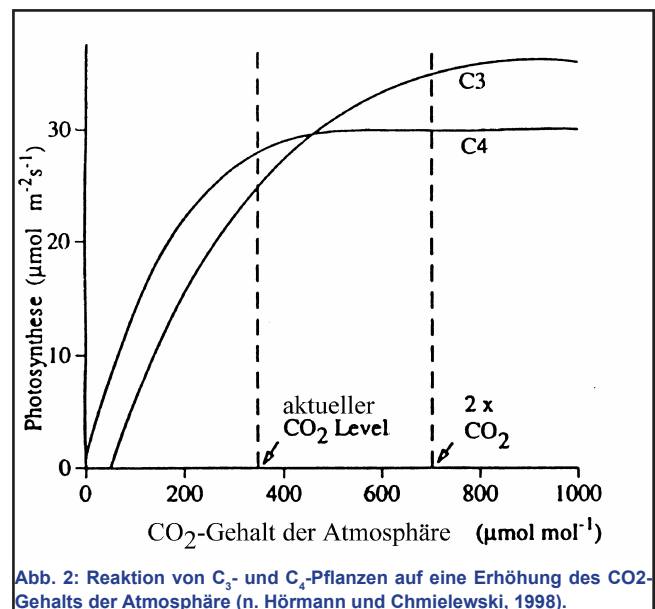


Abb. 2: Reaktion von C_3 - und C_4 -Pflanzen auf eine Erhöhung des CO_2 -Gehalts der Atmosphäre (n. Hörmann und Chmielewski, 1998).

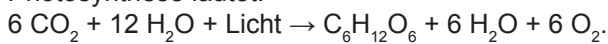
Jedoch kommen die positiven und ertragssteigernden Effekte der CO_2 -Düngung nur dann vollständig zur Wirkung, wenn die klimatischen Veränderungen (Temperaturerhöhung, Wasserverfügbarkeit) nicht zu einem zusätzlichen Stressfaktor für die Pflanzen werden. In der Regel fällt ein CO_2 -Düngungseffekt deshalb meist geringer aus.

4. Temperatur und Pflanzenwachstum

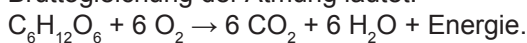
Das Wachstum und die Entwicklung von Pflanzen setzen im Allgemeinen bei Temperaturen über dem Gefrierpunkt (meist bei ca. 3 – 5 °C) ein. Mit zunehmender Temperatur werden die Entwicklungsvorgänge in der Pflanze beschleunigt. Dies ist bis zu einer, für jede Pflanzenart optimalen Temperatur möglich. Danach

nehmen die Wachstumsraten ab, bis durch sehr hohe Temperaturen das Enzymsystem zerstört wird und der Zelltod eintritt (Abb. 3).

Die Photosyntheseraten der Pflanzen erhöhen sich dementsprechend mit steigenden Temperaturen bis zu einem Höchstwert. Die Bruttogleichung der Photosynthese lautet:



Um die Lebensprozesse der Pflanze aufrecht zu erhalten, wird ein Teil der von der Pflanze gebildeten Kohlenhydrate wieder veratmet. Hierbei wird Sauerstoff verbraucht und Kohlendioxid gebildet. Die Bruttogleichung der Atmung lautet:



Die maximale Produktion (Netto-Photosynthese) bzw. der höchste Ertrag wird dann erreicht, wenn möglichst viel Kohlenhydrate produziert und wenig wieder veratmet werden. Beide Prozesse, Photosynthese und Atmung, sind temperaturabhängig. Der optimale Temperaturbereich der Photosynthese liegt für die meisten Pflanzen der mittleren Breiten im Bereich zwischen 18 und 25 °C (Winterweizen 17 – 23 °C, Kartoffeln 15 – 20 °C, Mais 25 – 30 °C). Bei diesem Temperaturoptimum sind, wenn alle anderen Faktoren ebenfalls optimal sind (Beleuchtungsstärke, Nährstoffversorgung, Wasser), die Photosyntheseraten der Pflanze am größten (Abb. 3). Mit weiter steigender Temperatur nimmt die Netto-Photosynthese zunehmend ab und wird beim Überschreiten einer Maximaltemperatur schließlich eingestellt. Für die Umwandlung der Assimilate in Ernteprodukte sind für die meisten Kulturarten der mittleren Breiten Temperaturen unter 20 °C optimal.

Zur Abschätzung der Auswirkung einer Temperaturerhöhung auf landwirtschaftliche Nutzpflanzen ist es deshalb wichtig zu wissen, ob die Pflanze während der Vegetationszeit noch unterhalb oder schon über ihrem Optimalbereich liegt. Ein typisches Beispiel für eine Kulturart unterhalb des Optimums ist der Anbau von Körnermais in Schleswig-Holstein bzw. in Nordeuropa. Hier ist bei ausreichender Wasser- und Nährstoffversorgung mit einer Erhöhung der Erträge zu rechnen, da die Temperatur jenseits der heutigen Anbaugrenze (Dänemark, Schleswig-Holstein) limitierend wirkt. Winterweizen hingegen bringt in Norddeutschland mit die höchsten Erträge, da bei Sommertemperaturen unter 20 °C die Assimilate optimal im Korn eingelagert werden. Bei höheren Temperaturen wird dieses Ertragsniveau u.U. aufgrund höherer Atmungsverluste und einer Verkürzung der Kornbildungsphase nicht mehr zu halten sein. Diese geringere Einzelkornmasse könnte teilweise durch höhere Bestandesdichten infolge milderer Winter bzw. durch größere Kornzahlen je Ähre kompensiert werden.

5. Wasserhaushalt und Pflanzenwachstum

Die Verfügbarkeit von Wasser für das Wachstum und die Entwicklung von Pflanzen hängt nicht nur von der jährlichen Höhe und Verteilung der Niederschläge ab, sondern ebenso von den physikalischen Fähigkeiten des Bodens, Wasser zu speichern, von den klimatischen Verhältnissen, die die Verdunstung des Bestandes steuern und letztendlich vom Wasserbedarf der Nutzpflanzen selbst. Zwischen Biomassebildung und Wasserverbrauch der Pflanzen besteht ein enger Zusammenhang. Bei Wassermangel kommt es zu einer Einschränkung der Transpiration und damit in der Regel zu einer linearen Verminderung der Stoffproduktion. Die Folge sind zwangsläufig Ertragseinbußen. Ausgedrückt wird der Zusammenhang zwischen Wasserverbrauch und Biomassebildung durch den Transpirationskoeffizienten. Er beschreibt das Verhältnis zwischen verbrauchtem Wasser und gebildeter Trockenmasse eines Pflanzenbestandes.

Zwischen den einzelnen Nutzpflanzenarten ergeben sich große Unterschiede im Wasserverbrauch, die nicht zuletzt von der Wachstumszeit und -dauer sowie der Kulturart abhängig sind. Beispielsweise haben Wintergetreidearten, die einen Teil ihrer Entwicklung in der kühleren Jahreszeit (Herbst, Frühjahr) durchlaufen, einen geringeren Wasserverbrauch als die entsprechenden Sommerformen. Blattfrüchte wie Kartoffeln

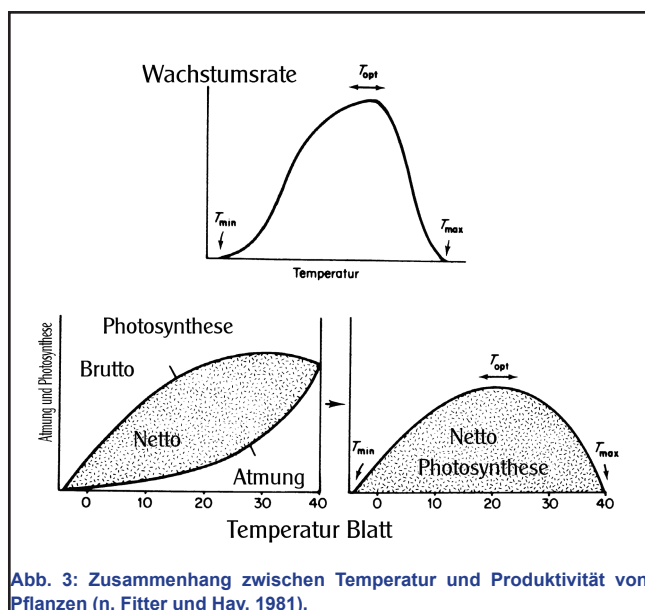


Abb. 3: Zusammenhang zwischen Temperatur und Produktivität von Pflanzen (n. Fitter und Hay, 1981).

und Zuckerrüben haben aufgrund ihrer relativ langen Vegetationszeit einen höheren Wasserbedarf als Getreide. Die höchsten Wasserverbrauchswerte weisen langlebige Futterpflanzen (Rotklee, Luzerne) und Grünland auf.

Allein in Deutschland ergeben sich relativ große Unterschiede in der räumlichen Verteilung der Niederschläge. Vor allem in Ostdeutschland ist der Anteil von Flächen mit mittleren jährlichen Niederschlagshöhen unter 600 mm überdurchschnittlich hoch.

Die globale Erwärmung wird eine Verstärkung des Wasserkreislaufes nach sich ziehen und somit im Mittel zu etwas höheren Niederschlagsmengen führen. Eine Intensivierung des hydrologischen Zyklus (Wasserkreislauf) bedeutet gleichsam höhere Verdunstung infolge allgemein höherer Temperaturen, wodurch die zusätzlichen Niederschlagsmengen nicht durch die Pflanze genutzt werden können. Wenn die Intensität einzelner Niederschlagsereignisse zunimmt, ist gleichfalls mit höheren oberirdischen Abflussraten zu rechnen. Stärkere Verdunstung und größerer Abfluss tragen nicht zu einer Erhöhung des Bodenwasservorrats bei, der letztendlich für das Wachstum und die Ertragsbildung der landwirtschaftlichen Kulturen entscheidend ist.

Zudem ist im Pflanzenbau die jahreszeitliche Verteilung der Niederschlagsereignisse von großer Bedeutung. Für Deutschland ergeben sich Hinweise, dass gerade in den Sommermonaten die Niederschläge abnehmen könnten. Beispielsweise hat in Brandenburg die extrem trockene und heiße Witterung von April bis August 2003 bei allen landwirtschaftlichen Kulturen zu deutlichen

Ertragseinbußen geführt. Auf den leichten Sandböden wurden, ohne Bewässerung, die pflanzenverfügbaren Bodenwasservorräte schnell verbraucht (Abb. 4).

Künftig dürften solche Sommer häufiger auftreten und damit die Landwirtschaft vor neue Herausforderungen stellen.

6. Länge der thermischen Vegetationsperiode

Ungeachtet der pflanzenspezifisch differierenden Temperaturansprüche wird oft der Zeitraum im Jahr, in dem die Tagesmitteltemperatur der Luft über 5 °C liegt, als thermische Vegetationsperiode bezeichnet. Sie charakterisiert den Abschnitt im Jahr, in dem für die Mehrzahl der Pflanzenarten Wachstum und Entwicklung möglich sind.

Für die Land- und Forstwirtschaft ist dies der Zeitraum, in dem die landwirtschaftlichen Kulturen bzw. Baumbestände gedeihen können. Verschiebungen in der Andauer der Vegetationsperiode können beispielsweise im landwirtschaftlichen Pflanzenbau Veränderungen in der Bewirtschaftung (z.B. Saatzeit, Zwischenfruchtanbau, Anzahl von Ernten im Jahr, Übergang vom Sommer- zum Wintergetreideanbau) bewirken und damit ökonomische Bedeutung erlangen.

Für Deutschland beträgt die mittlere Länge der Vegetationsperiode 235 Tage (Abb. 5). Sie dauert fast

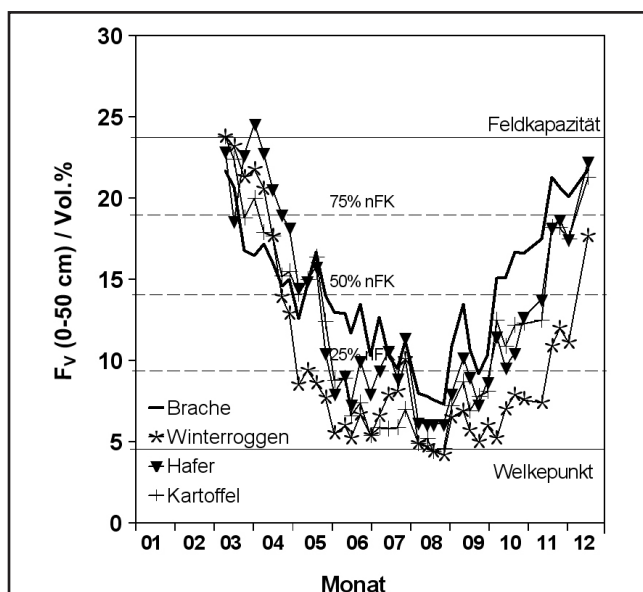


Abb. 4: Verlauf der Bodenfeuchtigkeit (FV in Vol.%) bis 50 cm Tiefe unter Schwarzbrache, Winterroggen, Hafer und Kartoffel im Jahr 2003, Daten: Agrarmeteorologisches Intensivmessfeld Berlin-Dahlem.

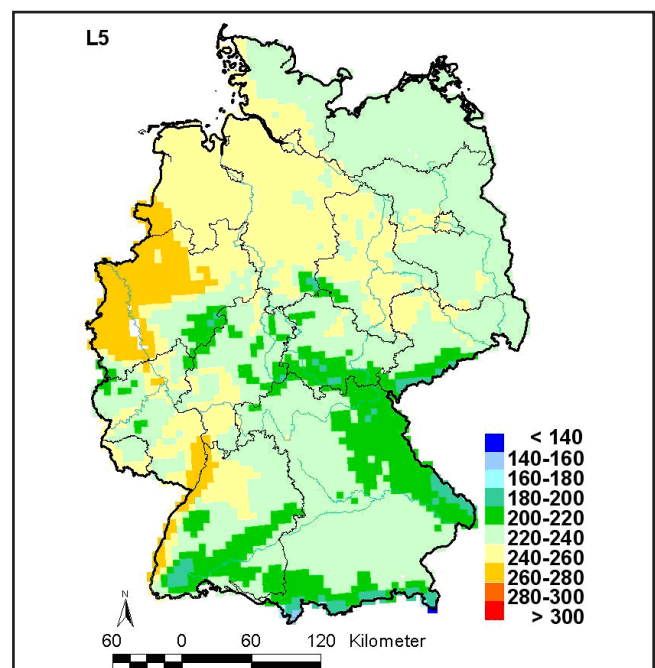


Abb. 5: Mittlere Länge der thermischen Vegetationsperiode (L5) in Deutschland in Tagen, 1961-2000 (n. Chmielewski et al., 2007).

8 Monate, an denen die täglichen Durchschnittstemperaturen über 5 °C liegen. Im langjährigen Mittel (1961-2000) beginnt dieser Zeitraum am 11. März und endet am 1. November.

Innerhalb des Bundesgebietes sind klare regionale Unterschiede erkennbar. Die längste Vegetationsperiode liegt im Bereich des Oberrheingrabens und in der Kölner Bucht vor. Hier treten im Jahresmittel auch die höchsten Temperaturen auf. Weitere begünstigte Gebiete sind Niedersachsen und Sachsen-Anhalt. Die deutschen Mittelgebirge, das Alpenvorland und die Alpen zeigen hingegen temperaturbedingt eine deutlich kürzere Vegetationsperiode.

Die in den letzten Jahrzehnten beobachtete Erwärmung der Atmosphäre hat bereits zu einer Verlängerung der thermischen Vegetationszeit geführt. Für Deutschland hat diese Periode im Mittel von 1961-2005 um 25 Tage zugenommen. Die Ausdehnung dieses Zeitraums ist vor allem auf den früher eintretenden Vegetationsbeginn (zeitigeres Auftreten von Tagesmitteltemperaturen $\geq 5^\circ\text{C}$) zurückzuführen. Dieser Zeitpunkt hat sich in den letzten 45 Jahren um immerhin 19 Tage verfrüht (Abb. 6). Das Ende der thermischen Vegetationsperiode hat

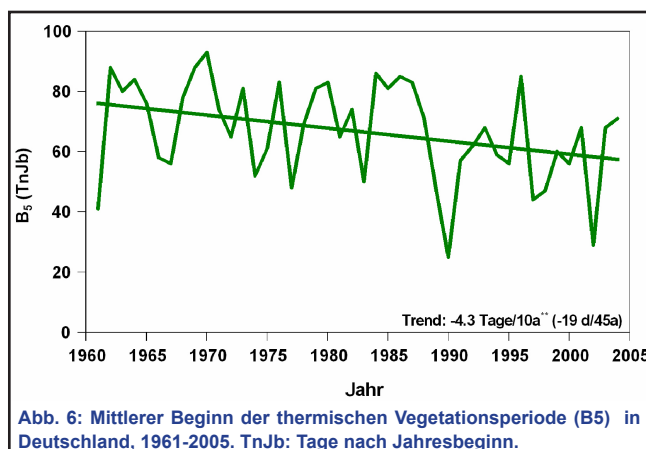


Abb. 6: Mittlerer Beginn der thermischen Vegetationsperiode (B5) in Deutschland, 1961-2005. TnJb: Tage nach Jahresbeginn.

sich um 6 Tage nach hinten verschoben.

Diese bereits heute zu beobachtende Verschiebung des thermischen Vegetationsbeginns und -endes wird sich in diesem Jahrhundert fortsetzen. Entsprechend des betrachteten Klimaszenarios differieren die zu erwartenden Veränderungen; jedoch ist in allen Fällen von einer Verlängerung der Vegetationsperiode auszugehen. Legt man beispielsweise das Szenario A2 zugrunde, in dem die globalen CO₂-Emissionen auf fast 30 Gt C im Jahr 2100 und damit der atmosphärische Kohlenstoffgehalt von heute 380 ppm auf 840 ppm im Jahr 2100 ansteigen, so ergibt sich für Deutschland eine Verlängerung der Vegetationsperiode von über 2

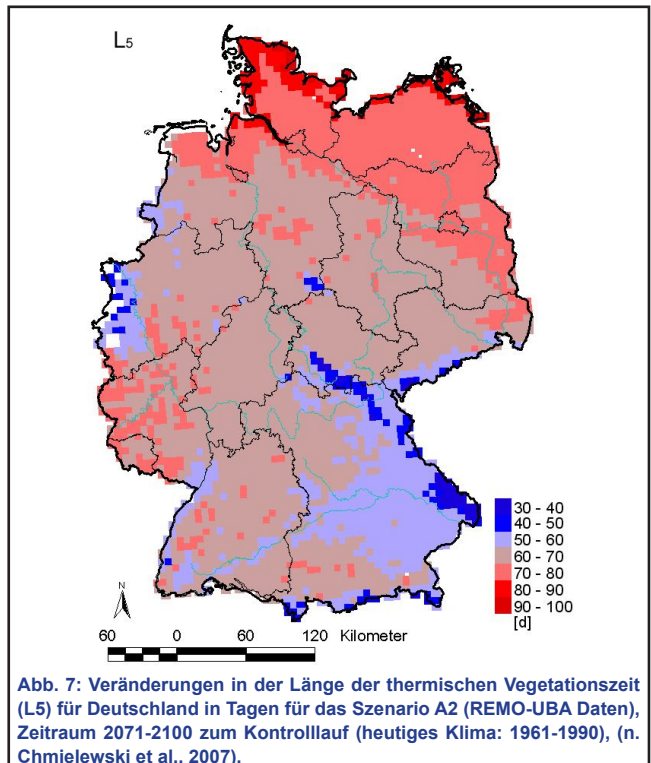


Abb. 7: Veränderungen in der Länge der thermischen Vegetationszeit (L5) für Deutschland in Tagen für das Szenario A2 (REMO-UBA Daten), Zeitraum 2071-2100 zum Kontrolllauf (heutiges Klima: 1961-1990), (n. Chmielewski et al., 2007).

Monaten. Dabei ist die Zunahme am Beginn und am Ende der Periode etwa gleich groß (ca. 35 Tage, Abb. 7).

7. Veränderungen in der Pflanzenentwicklung

Der Eintritt von Entwicklungsstadien (phänologische Phasen) und die daraus resultierende Andauer der Entwicklungsphasen bei Pflanzen sind in hohem Maße temperaturabhängig. Phänologische Beobachtungen zeigen anschaulich, wie sich Klimaänderungen auf die Entwicklung der Pflanze auswirken. Dies gilt vor allem für die Entwicklungsstadien im Frühjahr, d.h. das Aufbrechen der Knospen und den Beginn von Blattentfaltung und Blüte. Die phänologischen Phasen im Herbst, wie Blattverfärbung oder Blattfall, werden neben der Lufttemperatur von einer Vielzahl weiterer Faktoren beeinflusst, so dass hier der Zusammenhang zwischen Temperatur und Phaseintritt eher schwach ist.

Die nachfolgende Abbildung zeigt den mittleren Beginn der Blattentfaltung einiger ausgewählter Gehölze (Mittelwert aus Birke, Kirsche, Eberesche, Alpenjohannisbeere) in Europa (Abb. 8). Sehr anschaulich widerspiegeln sich hier die thermischen Verhältnisse über den Kontinent im Frühjahr, mit höheren Temperaturen im südwestlichen und südlichen

Europa und noch kühler Witterung im Nordosten. Im langjährigen Durchschnitt beginnt in Mitteleuropa der Blattaustrieb der Gehölze zwischen dem 10. und dem 25. April. Viel früher treiben die Bäume an den Küsten des Mittelmeers aus; Nachzügler sind eindeutig die Gehölze in Skandinavien. So schreitet der Frühling in Europa um 2,3 Tage je 100 km von Süd nach Nord und um 0,5 Tage je 100 km von West nach Ost voran. Er verspätet sich um 3,1 Tage pro 100 m Höhenzunahme, da in den Höhenlagen und Gebirgen die Temperaturen im Mittel niedriger sind als im Flachland.

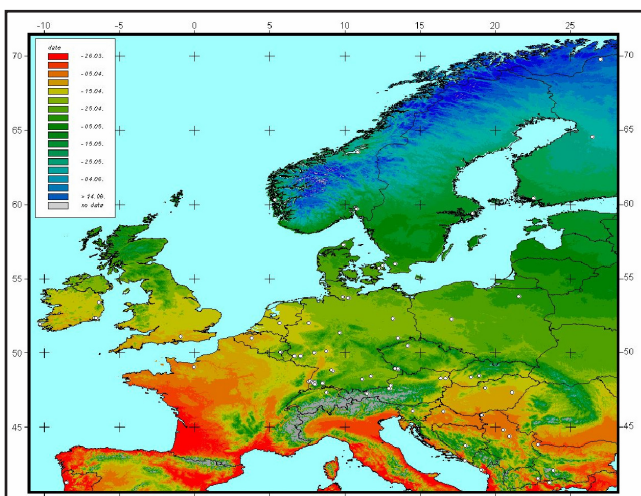


Abb. 8: Mittlerer Beginn der Blattentfaltung ausgewählter Gehölze (Birke, Kirsche, Eberesche, Alpenjohannisbeere) in Europa, 1968-2000 (n. Rötzer und Chmielewski, 2001).

Die zunehmend wärmer werdenden Frühjahre haben den Termin der Blattentfaltung in Europa immer weiter verfrüht. Sehr anschaulich war dies im Jahr 2007 zu beobachten, in dem der Blattaustrieb für einige Baumarten um bis zu 3 Wochen zeitiger begann. In den letzten ca. 35 Jahren tritt die Blattentfaltung der Gehölze im Mittel um 7 Tage früher ein. Der Beginn des Blattfalls im Herbst hat sich lediglich um 3 Tage verspätet, so dass sich für einzelne Gehölze die individuelle Vegetationszeit um insgesamt 10 Tage verlängert hat.

Der zeitigere Beginn der Blattentfaltung steht eindeutig im Zusammenhang mit den höheren Temperaturen, vornehmlich im Zeitraum von Februar bis April (Abb. 9). In Europa hat sich die mittlere Temperatur Februar-April von 1968-2005 um 0,6 °C erhöht. Die Entwicklung der Gehölze hat sich entsprechend verfrüht, so dass im Mittel einer Temperaturzunahme von 1 °C eine Verfrühung im Beginn der Blattentfaltung von einer Woche gegenübersteht.

Auch Obstgehölze und Nutzpflanzen haben naturgemäß

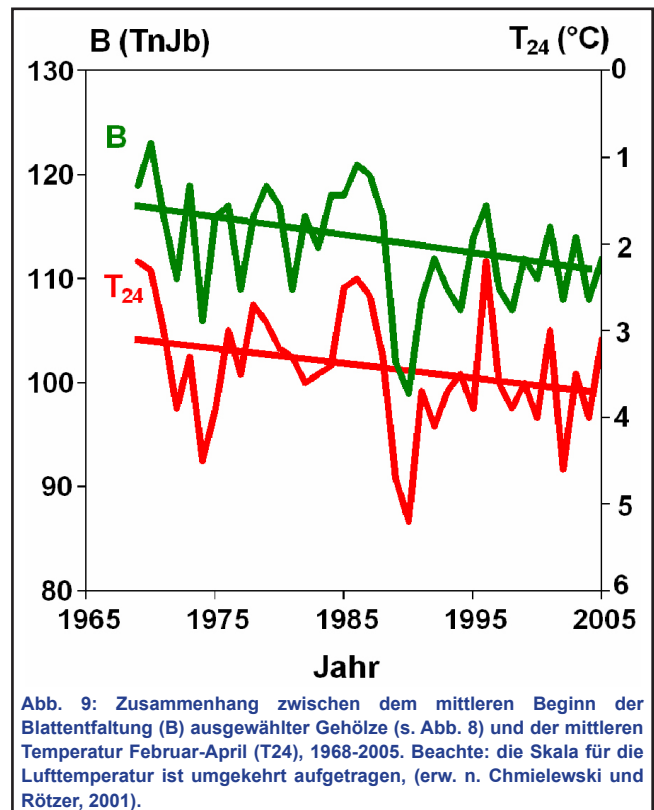
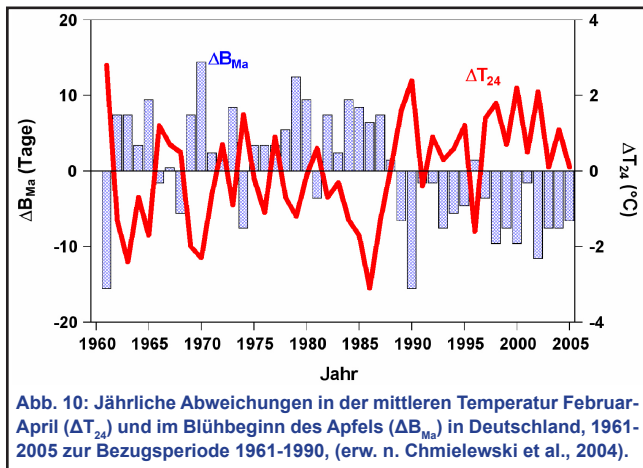


Abb. 9: Zusammenhang zwischen dem mittleren Beginn der Blattentfaltung (B) ausgewählter Gehölze (s. Abb. 8) und der mittleren Temperatur Februar-April (T₂₄), 1968-2005. Beachte: die Skala für die Lufttemperatur ist umgekehrt aufgetragen, (erw. n. Chmielewski und Rötzer, 2001).

in ihrer Entwicklung auf den jüngsten Temperaturanstieg reagiert. Von 1961-2005 hat sich in Deutschland beispielsweise der Blühbeginn der Apfelbäume um immerhin 12 Tage nach vorne verschoben (Abb. 10). Deutlich sind hier die überwiegend positiven Temperaturabweichungen seit dem Ende der 1980er Jahre zu erkennen. Seit diesem Zeitpunkt treten mit Ausnahme des Jahres 1996 nur noch Verfrühungen im Blühbeginn auf.

Bei landwirtschaftlichen Kulturen zeigt sich deutschlandweit eine vergleichbare Reaktion. Beim Wintergetreide beginnt das Längenwachstum (Schossbeginn) seit 1988 ebenfalls zeitiger. Diese Tendenz setzt sich über alle Entwicklungsstadien bis zum Erntetermin fort. Für Mais und Zuckerrüben konnten ebenfalls Verfrühungen in den phänologischen Eintrittsterminen nachgewiesen werden. Bei landwirtschaftlichen Nutzpflanzen können thermisch bedingte Veränderungen in der Länge von Entwicklungsphasen durchaus die Ertragsbildung beeinflussen. In der Regel wirkt sich eine Temperaturerhöhung in kühleren Perioden, beispielsweise im Herbst oderzeitigem Frühjahr, über eine Verlängerung der für die Ausbildung von Ertragsorganen wesentlichen Entwicklungsphasen, positiv aus (z.B. beim Wintergetreide). Stark erhöhte Temperaturen im späten Frühjahr und Sommer führen allerdings zu Phasenverkürzungen und infolge dessen

zu Reduktionen bei bereits angelegten Ertragsorganen oder zu deren mangelhafter Ausbildung. Dieser Negativeffekt kann durch Wassermangel zusätzlich verstärkt werden.



Für Obstgehölze ist der frühere Blühbeginn ebenfalls nicht unkritisch zu sehen. Eine zeitigere Baumbüte kann die Gefahr von Spätfrostschäden (letzte Fröste im Frühjahr) erhöhen. Eine einzige strenge Frostnacht kann den Ertrag des ganzen Jahres nahezu vernichten, wenn keine geeigneten Schutzmaßnahmen eingeleitet wurden.

In Forstbeständen kann eine Verlängerung der Vegetationszeit (Zeitraum zwischen Blattaustrieb und Blattverfärbung bzw. Blattfall) eine höhere Produktivität der Wälder und somit einen stärkeren jährlichen Holzzuwachs bewirken. Dies bedingt wiederum Veränderungen im Kohlenstoffkreislauf der Ökosysteme. Die Verfrühung des Vegetationsbeginns ist im Allgemeinen von größerer Bedeutung, da im Frühjahr die Wachstumsbedingungen für die Bäume infolge stärkerer Einstrahlung und besserer Wasserversorgung günstiger sind als zum Ende der Vegetationszeit. Diese positiven Effekte einer verlängerten Vegetationszeit kommen jedoch auch nur dann zum Tragen, wenn sich die Wachstumsbedingungen innerhalb dieses Zeitraumes nicht deutlich verschlechtern. Hohe Temperaturen und Trockenheit, wie sie im Jahr 2003 beobachtet wurden, führten in exponierten Lagen zu einem zeitigeren Blattfall und beendeten damit vorzeitig das Wachstum der Bäume. Trockenheit kann zudem die Waldbrandgefahr deutlich erhöhen. Extreme Witterungsereignisse wie schwere Stürme und Unwetter fügen den Wäldern schwere Schäden zu. Beispiele sind die Stürme „Vivian“ im Februar 1990 und „Kyrill“ im Januar 2007.

Klimaänderungen können zudem Störungen im Wachstumsrhythmus der Pflanzen zur Folge haben. Ungewöhnlich milde Witterungsabschnitte im Winter, beispielsweise im Januar und Februar, führen u.U. zu einer Enthärtung der Gehölze, wodurch in nachfolgenden Kälteperioden die Gefahr von Frostschäden an Bäumen zunehmen kann.

8. Befall mit Schädlingen und Krankheiten und Unkräuter

Klimaänderungen wirken sich nicht nur auf die Pflanzen selbst, sondern auch auf ihre Krankheiten und Schädlinge aus. Einige klassische Beispiele wie z. B. die Missernten und die Hungersnöte in den Jahren vor 1850 durch Kraut- und Knollenfäule in Irland zeigen, dass die landwirtschaftlichen Erträge dadurch genauso gefährdet sein können wie durch klimatische Änderungen.

Gleichzeitig ist der Einfluss von Nässe- oder Trocken- bzw. von Hitze- oder Kälteperioden ausschlaggebend für die Biomassebildung und den Befall der Kulturpflanzen mit Schaderregern.

Durch den Temperaturanstieg in den letzten Jahrzehnten haben die Perioden höherer Lebensaktivität für tierische Schaderreger zugenommen. Saugende (z.B. Blattläuse, Wanzen, Zikaden) und beißende Schädlinge (z.B. Blattrandkäfer, Schnecken, Feldmäuse) schädigen die Kulturpflanzen zeitiger und nachhaltiger. Viele dieser Arten könnten bei längeren Vegetationsperioden unter begünstigenden Klimabedingungen ein massenhaftes Vermehrungsverhalten zeigen. So sind z.B. 1000 Feldmäuse innerhalb von weniger als 20 Tagen in der Lage, bis zu 5000 Nachkommen zu produzieren. Schnecken haben noch wesentlich höhere Vermehrungsraten (300 Eier je Altschnecke mit zwei bis drei Generationen im Jahr) in einer Entwicklungszeit von fünf bis sechs Wochen mit hoher Fressaktivität zwischen Schlupf und Geschlechtsreife. Bedenklich ist zudem, dass die populationsmindernde Wirkung niedriger Wintertemperaturen zunehmend entfällt.

In vielen Regionen Deutschlands finden aber auch bisher weniger bedeutungsvolle Insekten, wie z.B. der Wärme liebende Maiszünsler, zunehmend günstige Entwicklungsbedingungen. Die Eiablage des Maiszünslers zwischen Juli und August mit 700 bis 1000 Eiern pro Weibchen wird durch eine zunehmende Juli-Trockenheit besonders gefördert. Bohrlöcher im Stängel können dann zu Sekundärinfektionen mit Pilzkrankheiten führen.

Höhere atmosphärische CO_2 -Werte beeinflussen zudem den Stickstoffgehalt des Pflanzengewebes, wodurch stärkere Schäden durch Insektenfraß hervor-

gerufen werden. In höheren Breiten bestimmen Temperaturverhältnisse das Überleben von Eiern und Larven im Winter. Insgesamt könnte eine Erwärmung um 3 – 6 °C die Verbreitungsgrenze mancher Insekten in Europa um über 1000 km nach Norden verschieben und verantwortlich dafür sein, dass im Jahreszyklus eine zusätzliche Generation heranwächst.

Im Obstbau ist beispielsweise der Apfelwickler ein weit verbreiteter Schädling, der sich in den Apfel einbohrt und somit beachtlichen wirtschaftlichen Schaden verursacht (Abb. 11). Die Entwicklung des Apfelwicklers ist primär temperaturabhängig, wodurch sich mit steigenden Temperaturen der Befallsdruck erhöhen könnte. Demzufolge ist es vorstellbar, dass sich künftig in Deutschland eine dritte Generation dieses Schädlings im Verlauf des Jahres ausbilden kann, wie es in Südfrankreich oder in warmen Gebieten der USA heute schon gegeben ist.

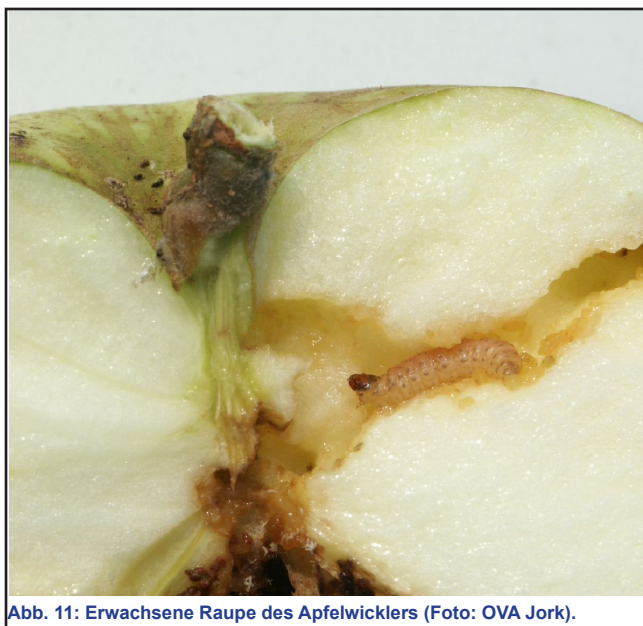


Abb. 11: Erwachsene Raupe des Apfelwicklers (Foto: OVA Jork).

Sich verändernde Klimabedingungen beeinflussen die Ausbreitung verschiedener Erreger wie Viren, Bakterien oder Pilze. Hier seien Krankheiten wie Mehltau oder Rost bei Getreide und Blattfleckenkrankheiten wie Rizomania bei Zuckerrüben genannt. Zum Beispiel bricht die durch Pilze bedingte Krautfäule an Kartoffeln bei einem wärmeren und feuchteren Klima früher und stärker aus. Trockene und heiße Sommer reduzieren dagegen die Infektion durch Pilzkrankheiten, da die Resistenz der Pflanzen zunimmt.

Günstige Voraussetzungen für Infektionen mit Getreidefußkrankheiten wie Rost und Septoria bietet die zunehmend feuchte und milde Winterwitterung

in Mitteleuropa, verstärkt nach Frühsaaten und bei üppiger Herbstentwicklung. In der zeitiger einsetzenden Vegetationsperiode und nach höherer Winterfeuchte ist diese Tendenz noch stärker ausgeprägt. Das Zusammenwirken von Feuchtigkeit und Temperatur kommt bei der Ausbreitung von Krankheiten in Getreidebeständen deutlich zum Ausdruck, wie beispielsweise beim Braunrost, Mehltau oder der Blattfleckenkrankheit.

In Forstbeständen gibt es ebenfalls eine Vielzahl von Schädlingen, die sich unter bestimmten Witterungsbedingungen überdimensional vermehren können und entsprechenden Schaden anrichten. Bekanntgeworden ist hierbei vor allem der Borkenkäfer. Neben den natürlichen Fichtenbeständen in Hochlagen, hat der Mensch durch die Etablierung von Fichtenreinbeständen optimale Borkenkäferbiotope geschaffen. Hier finden vor allem der Buchdrucker und Kupferstecher in warmen und trockenen Jahren gute Möglichkeiten zur Massenvermehrung wie beispielsweise 1994/95, 1999 und 2003/04. Wie die räumliche Verbreitung von Schädlingen und Krankheitserregern in unserem künftigen Klima aussehen wird, hängt vor allem von der Reaktion der Wirtspflanzen auf die neuen klimatischen Bedingungen ab. Aber auch die Anpassung der Anbaupraktiken an den Klimawandel wird hier eine große Rolle spielen.

Klimaänderungen beeinflussen nicht nur den Befall von Nutzpflanzenbeständen mit Schädlingen und Krankheiten, sondern wirken sich auch auf das Gedeihen konkurrierender Begleitpflanzen (Unkräuter) aus. Ihre Zusammensetzung kann sich ändern und den Konkurrenzdruck auf die Nutzpflanzenbestände verstärken. Viele Unkräuter könnten ihre Verbreitung in wärmere Regionen ausdehnen.

9. Mögliche Folgen des Klimawandels auf Erträge und Anbauregionen

Alle Folgen der globalen Erwärmung sind auch heute noch keineswegs abzuschätzen. Aktuelle Analysen gehen davon aus, dass sich die landwirtschaftliche Produktion bei einer Verdoppelung des CO₂-Gehalts der Atmosphäre und einer Anpassung der Bewirtschaftung im globalen Mittel quantitativ nicht wesentlich verändern wird. Wahrscheinlich ist, dass der Klimawandel die Landwirtschaft in verschiedenen Erdregionen unterschiedlich stark treffen wird.

In den nächsten Jahrzehnten wird vor allem im Süden Europas durch wachsende Trockenheit der Anbau von Feldfrüchten immer schwieriger. In nordeuropäischen Ländern wie Schweden, Dänemark und Finnland

hingegen stehen demnach wärmere und feuchtere Zeiten an, was sich auf den landwirtschaftlichen Ertrag möglicherweise positiv auswirken wird.

Als direkte Folge der Temperaturerhöhung ist mit einer Erweiterung der Anbauzonen nach Norden (Skandinavien, Russland) und in höhere Lagen (alpine Regionen) zu rechnen. So könnten z. B. die Anbaugrenzen für Sommerweizen und -gerste um bis zu 500 km nach Norden verschoben werden.

Modellrechnungen für die USA prognostizieren zum Beispiel folgende Zuspitzung: An der West- und vor allem an der Ostküste könnte es in den kommenden hundert Jahren immer ausdauernder regnen, so dass die US-Ernteerträge insgesamt sogar besser werden könnten. Im Landesinnern hingegen, vor allem in den Bundesstaaten Kansas, Colorado und Nebraska, werden Hitze und Trockenheit derart zunehmen, dass die Landwirtschaft dort sogar unmöglich werden könnte.

Durch abnehmende Niederschläge kann sich in vielen Entwicklungsländern die Situation noch weiter verschärfen. Die bestehenden Ungleichgewichte auf der Erde werden also vermutlich noch zunehmen.

Die Ertragssicherheit landwirtschaftlicher Kulturarten wird neben der jährlichen Witterungsvariabilität im Wesentlichen von Extremereignissen und der Wasserversorgung bestimmt. Außergewöhnliche Witterungsereignisse wie lang anhaltende Trockenperioden oder Starkniederschläge können zu schweren Ertragseinbußen führen.

Im Prinzip gelten die eingangs dargestellten Wirkungsmechanismen auch für Bäume und damit für die Erträge in der Forstwirtschaft. Allerdings müssen hier zusätzliche Bedingungen berücksichtigt werden. Während die Landwirtschaft mit jährlich wechselnden Kulturarten zu tun hat, sind in der Forstwirtschaft die Bestände oft aus mehreren Arten zusammengesetzt und wachsen teilweise mehr als 100 Jahre bis zur Ernte. Hieraus resultiert eine Reihe von Problemen bei der Bewertung und Berechnung von Klimaänderungen. So muss aufgrund der langen Lebenszeit von Bäumen die Geschwindigkeit der Klimaänderung bzw. der Verschiebung von Klimazonen mit berücksichtigt werden.

Die thermischen Verhältnisse und die Wasserbilanz eines Standorts wirken auf vielfältige Weise auf die Baumphysiologie. Die Sensitivität der einzelnen Arten gegenüber den klimatischen Standortfaktoren in Bezug auf Wachstum, Reproduktion und die Fähigkeit, Stresssituationen zu überdauern, ist wesentlich für ihre Verbreitung, Anbaueignung und ihr Produktionspotenzial. Der Klimawandel wird zu einer Verschiebung der Klimazonen nach Norden führen. Dies bedeutet, dass an der südlichen

Verbreitungsgrenze die Wälder absterben könnten. Ebenso ist mit einer Verschiebung der Baumarten in höhere Lagen der Mittelgebirge zu rechnen. Wärme liebende Baumarten können somit auch bisher für sie nicht geeignete Standorte erreichen. Hierdurch wird sich das Artenspektrum in den Höhenlagen verändern. Baumarten, die bisher mit kälteren Temperaturen besser zu Recht kamen, werden weiter in die Höhe verdrängt.

Zusammenfassend kann festgestellt werden: Gewinner werden die Wärme liebenden und anspruchslosen Baumarten sein, Verlierer hingegen weniger Wärme liebende Gehölze und Baumarten mit höheren Ansprüchen an Standort und Niederschlag. Sehr wahrscheinlich ist, dass Fichte und Buche an Fläche verlieren werden. Wärme liebende Baum- und Straucharten wie Kiefer, Douglasie, Traubeneiche, Hasel, Vogelkirsche, und Mehlbeere werden an Fläche gewinnen. Ebenso vermutlich die Birke als Pionierbaumart.

10. Anpassungsmaßnahmen in der Landwirtschaft

Auf moderate klimatische Veränderungen wird sich die moderne Landwirtschaft in den entwickelten Ländern relativ gut einstellen können. Sie hat vielfältige Möglichkeiten, sich durch Veränderungen im Management wie u.a. in der Fruchtfolge, der Sortenwahl oder der Bodenbearbeitung an die neuen Bedingungen anzupassen. Zunehmender Trockenheit in witterungssensitiven Entwicklungsabschnitten der Pflanze kann in begrenztem Maße durch Beregnung begegnet werden, wengleich sich hierdurch die Kosten in der landwirtschaftlichen Produktion erhöhen. Mit dem weiteren Voranschreiten der klimatischen Veränderungen kann es zunehmend schwieriger werden, geeignete Anpassungsmaßnahmen für die heute etablierten Nutzpflanzenarten zu entwickeln. Der Übergang zu neuen Sorten und Anbaustrategien wird dann zwangsweise notwendig. Entscheidend wird sein, ob sich die Landwirtschaft schnell genug und eigenständig an den Klimawandel anpassen kann, oder ob politische Maßnahmen und Programme erforderlich sind. Gerade die Zeiten des Übergangs von einem Klimazustand zu einem neuen, veränderten Zustand können zu erheblichen Anpassungsproblemen auf regionaler und lokaler Ebene führen. Hierzu zählt u. a. die Zunahme der jährlichen Klimavariabilität, auf die sich selbst eine hoch entwickelte Land- und Volkswirtschaft nur schwer einstellen kann. Zu verstärkten Schwankungen der landwirtschaftlichen Erträge könnte es auch kommen, wenn sich im Sommer häufiger Trockenperioden ausbilden (wie z.B. 1976, 1989, 1992, 1999, 2003).

Dies würde dann zu einer Änderung der Anbaustruktur z.B. von sommerannuellen hin zu winterannuellen Kulturen führen. Eine weitere Anpassungsstrategie ist der Anbau eines breiteren Kulturartenspektrums, um Ertragsverluste einzelner Nutzpflanzenarten durch andere Kulturarten auszugleichen. In diesem Zusammenhang kommt der Sortenwahl und Züchtung eine besondere Bedeutung zu. Die Wahl trockenoleranterer Sorten und Nutzpflanzen mit Resistenzen gegenüber vermehrtem Krankheits- und Schädlingsdruck, stellt ebenfalls eine Lösung dar, um sich an veränderte Anbaubedingungen anzupassen. Der Einsatz effizienter Dünger mit Langzeitwirkung und die Verwendung von Pflanzenschutzmitteln, die auf die geänderten klimatischen Bedingungen abgestimmt sind (höherer Populationsdruck), ist eine weitere Möglichkeit zur Anpassung an geänderte Umweltbedingungen.



Foto: CHM.

Veränderungen in der Wasserverfügbarkeit kann auf unterschiedliche Art und Weise begegnet werden. Die *Gestaltung der Fruchtfolge* ist optimal an die klimatischen Verhältnisse des Standortes anzupassen, unter Beachtung der Wasseransprüche und Trockentoleranz einzelner Kulturarten. Über die Saatstärke und damit Bestandesdichte lässt sich ebenfalls der Wasserverbrauch steuern. Der Anbau von Zwischenfrüchten ist an Trockenstandorten oft nicht empfehlenswert, um eine Gefährdung der Wasserversorgung für eventuelle Deck- oder Nachfrüchte auszuschließen. *Direktsaat* und *konservierende Bodenbearbeitungsmethoden*, die möglichst wenig die Bodenoberfläche zerstören, sind ebenfalls Möglichkeiten, gerade auf leichten Böden den Wasserhaushalt zu schonen. Durch die nur lockernde, flache Bearbeitung der Krume bleibt mehr Feuchtigkeit

für die Kultur im Boden.

In jedem Fall wird landwirtschaftliches Wissen und flexibles Management erforderlich sein, um eine optimale Anpassung an die sich ändernden klimatischen Verhältnisse und die zunehmende Witterungsvariabilität zu erreichen.

11. Anpassungsmaßnahmen in der Forstwirtschaft

In Mitteleuropa existieren natürliche Wälder praktisch nicht mehr. Über die Artenzusammensetzung entschied in der Vergangenheit eher der Mensch als die natürliche Selektion durch das Klima (z. B. Fichtenreinbestände). Baumschädlinge, wie beispielsweise der Borkenkäfer,



Foto: JUSO.

die sich vor allem durch Fichtenreinbestände gut entwickeln konnten, können nur durch ein sorgfältiges Forstmanagement in ihrer Ausbreitung eingeschränkt werden. Hierzu zählen Maßnahmen wie das Borkenkäfer-Monitoring. Eingeschlagene Bäume sollten sofort abtransportiert oder entrindet werden, bereits befallene Bäume sind sofort zu beseitigen. Ausgehend von der Diskussion zu Waldschäden und den Auswirkungen des Klimawandels geht der Trend der Waldbewirtschaftung in den letzten Jahren weg von Monokulturen und hin zu Mischwäldern, die sich auch unter natürlichen Bedingungen hier einstellen würden. Der *Waldumbau* ist daher eine wichtige Maßnahme,

die Forstbestände auf den Klimawandel vorzubereiten. Zudem gewährleisten Mischwälder gegenüber Nadelwäldern höhere Grundwasserneubildungsraten infolge geringerer Interzeptions- (nicht wirksame Niederschläge durch die Benetzung der Bäume) und Transpirationsverluste außerhalb der Vegetationszeit. Dies würde bei abnehmenden Niederschlagshöhen den Wasserhaushalt verbessern.

Zitierte Literatur

- Chmielewski, F.-M., Blümel, K., Henniges, Y., Müller, A. 2007: Klimawandel und Obstbau in Deutschland. Projektspezifischer Teilbericht der Humboldt - Universität zu Berlin, 35 S.
- 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(1-2), 69-78.
- Chmielewski, F.-M., Rötzer, T. 2001: Response of tree phenology to climate change across Europe. *Agricultural and Forest Meteorology*, 108, 101-112.
- Fitter, A.H., Hay, R.K.M. 1981: *Environmental physiology of plants*. London: Academic Press. 367 pp.
- Hörmann, G., Chmielewski, F.-M. 1998: Mögliche Auswirkungen einer globalen Klimaänderung auf die Land- und Forstwirtschaft. In: J. Lozan, P. Hupfer, H. Graßl (Hrsg.): *Das Klima des 21. Jahrhunderts. Wissenschaftliche Auswertungen*, Hamburg 1998, 325-357.
- Rötzer, T., Chmielewski, F.-M. 2001: Phenological maps of Europe. *Climate Research* 18(3), 249-257.

Weiterführende Literatur

- Chmielewski, F.-M.; Köhn, W. 2000: Impact of weather on yield and yield components of winter rye. *Agricultural and Forest Meteorology*, 102, 253-261.
- Chmielewski, F.-M.; Köhn, W. 1999: Impact of weather on yield components of spring cereals over 30 years. *Agricultural and Forest Meteorology* 96, 49-58.
- Chmielewski, F.-M., Metz, R. 2005: Globale Klimaerwärmung – Folgen für Flora und Fauna. *Bayer Kurier, Bayer CropScience Magazin*, 20-23.
- Chmielewski, F.-M., Müller, A., Küchler, W. 2005: Possible Impacts of Climate Change on Natural Vegetation in Saxony, *Int. J. Biometeorol.*, 50: 96-104.
- Chmielewski, F.-M., Rötzer, T. 2002: Annual and spatial variability of the beginning of growing season in Europe in relation to air temperature changes. *Climate Research* 19(1), 257-264.
- Lozán, J., Graßl, H., Hupfer, P., Menzel, L., Schönwiese, Chr. (Hrsg.) 2004: *Warnsignal Klima. Genug Wasser für alle? Wissenschaftliche Auswertungen*, Hamburg, 96-100.
- Hupfer, P., Kuttler, W. (Hrsg.) 2006: *Witterung und Klima*, begründet von E. Heyer, 12. Aufl., Teubner Leipzig,

554 S.

- IPCC, 2007: *Climate Change 2007 Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the IPCC*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Metz, R., Chmielewski, F.-M., Günther, R., Hentschel, K.-D. 2004: Das große Krabbeln: Wie der Klimawandel die Populationsentwicklung wichtiger Schaderreger beeinflusst. *Neue Landwirtschaft*, 6, 36-40.
- Schwartz, M.D. (Ed.) 2003: *Phenology: An Integrative Environmental Science*. Kluwer Academic Publishers, Boston/ Dordrecht/London 564 S.