

Klimawandel und der Einfluss auf die Frühlingsphänologie

This Rutishauser
Sibylle Studer

Klimatologie und Meteorologie, Geographisches Institut der Universität Bern*
Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz

Climate change and its influence on spring phenology

Spring season (March–May) temperature trends show an increase in most regions of the world. In Europe, the spring temperatures important to plant physiology were the warmest during the decade 1997–2006 with respect to the past 500 years. A temperature increase of 1 °C would lead to an earlier onset of spring phenological phases of 2 to 10 days depending on the species and the region. A phenological multi-species index for Switzerland which includes several plant species is shown to be a suitable tool to describe Swiss spring variability over the past four decades. The index shows a mean trend of 1.5 days/decade from 1965–2002. The 280-year long series of the flowering of the cherry tree represents the index-variability of the past 40 years and gives the unique possibility to assess climate impact on spring phenological variability during past centuries.

Keywords: phenology, historical phenology, climate change, impact, temperature trend
doi: 10.3188/szf.2007.0105

* Hallerstrasse 12, CH-3012 Bern, E-Mail rutis@giub.unibe.ch

Pflanzenphänologische Beobachtungen haben in den vergangenen Jahren für die Klimafolgenforschung eine Renaissance erlebt (Menzel 2002). Jahreszeitlich wiederkehrende Erscheinungen wie Blattaustrieb, Blüte oder Blattfall erfassen Veränderungen im Klimasystem in ihrer Gesamtheit. Das Klima ist nebst dem Boden, der Bodenflora und -fauna, der aktuellen Witterung und den pflanzenindividuellen Einflüssen nur einer der bestimmenden Faktoren (Defila 1991). Das Klima zeigt aber im Frühling in den mittleren Breiten einen dominanten Einfluss, so dass phänologische Beobachtungen zu einem Indikator der früher einsetzenden Vegetationsperiode werden.

Dieser Artikel beleuchtet drei Aspekte der phänologischen Forschung mit besonderem Blick auf den Frühling und die längerfristigen Einflüsse des Klimas. In einem ersten Teil werden die wichtigsten und pflanzenphysiologisch relevanten Ergebnisse der rezenten Klimaforschung zusammengestellt. Wir diskutieren vor allem die zeitliche Entwicklung, besprechen aber auch räumliche Unterschiede. Ein zweiter Teil stellt Resultate aus der Schweiz vor und beschreibt statistische Analysen, die den Einfluss von Temperatur und Niederschlag auf die phänologischen Phasen untersuchen. Ein letzter Teil stellt diese Ergebnisse schliesslich in eine längere, zeitliche Perspektive und präsentiert Resultate für die vergangenen 300 Jahre.

Das globale und regionale Klima im Wandel

Die durchschnittliche globale 2-Meter-Temperatur ist im 20. Jahrhundert um rund 0.6 °C gestiegen (McCarthy et al 2001, ProClim 2002). Es ist sehr wahrscheinlich, dass die 1990er-Jahre global das wärmste Jahrzehnt seit Beginn der Instrumentenmessungen von 1856 darstellen (z. B. Mann et al 1999, McCarthy et al). Dasselbe gilt, wenn die Nordhemisphäre separat betrachtet wird. Für die vergangenen 2000 Jahre gibt es mit grosser Wahrscheinlichkeit keine wärmere Dekade als die 1990er-Jahre (Moberg et al 2005). Das erste Jahrzehnt des 21. Jahrhunderts weist bereits vier der fünf wärmsten Jahre auf und könnte als neues Rekordjahrzehnt in die Jahrbücher eingehen. Indikatoren für die Wachstumsperiode, abgeleitet aus Temperaturschwellenwerten, konnten einem signifikanten menschlichen Einfluss zugeordnet werden (Christidis et al 2007). Von ebensolcher, wenn nicht noch grösserer Bedeutung als die hohen, absoluten Temperaturen sind die Temperaturtrends der vergangenen Dekaden.

Abbildung 1 zeigt die globalen Frühlingstemperaturtrends (März–Mai) für 1951–2006¹. Die gemässigten bis arktischen nördlichen Mittelbreiten zeigen eine Erwärmung von bis zu 4 °C. Einzig im

¹ <http://data.giss.nasa.gov/gistemp/> (4. April 2007)

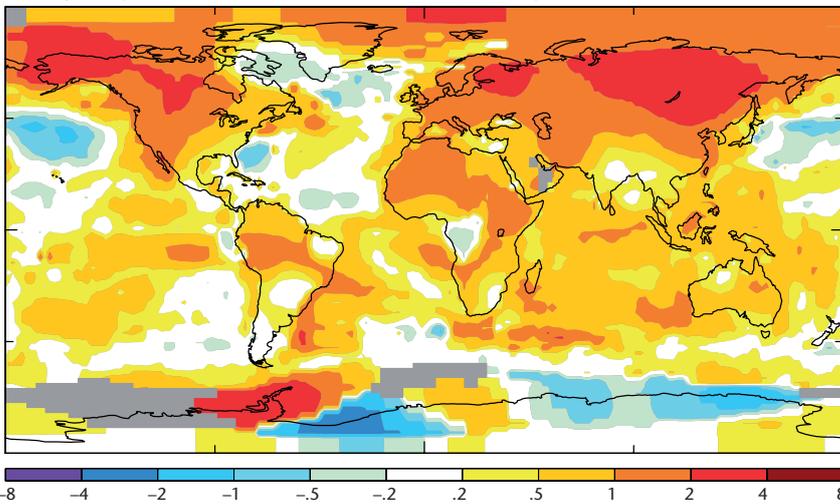


Abb 1 Trends der Frühlingstemperaturen (März–Mai) für die Jahre 1951–2006. Die meisten Regionen zeigen eine Erwärmung (gelbe bis rote Flächen) mit Ausnahme des nordöstlichen Kanadas, Südwestgrönlands, des nordöstlichen Pazifiks und Teilen der Antarktisküste (blaue Flächen). Stärkste Erwärmungen von über 2 °C erkennt man über Alaska, Nordosteuropa und Sibirien. In Europa ist ein zunehmender Frühlingserwärmungstrend von 0.5 bis 2 °C von Südwest- nach Nordost-Europa ersichtlich (Hansen et al 2001, Reynolds et al 2002).

Datenquelle: <http://data.giss.nasa.gov/gistemp/> (16. Juni 2006), GISS 2001 analysis, updated).

östlichen Kanada und in Südwestgrönland wurde eine Abkühlung gemessen. In Europa stieg die Frühlingstemperatur um 0.5 bis 2 °C mit zunehmender Intensität von Spanien gegen Nordosteuropa.

Xoplaki et al (2005) haben europäische Frühlingstemperaturen bis 1500 rekonstruiert. Wie die Jahresmitteltemperaturen ist für die pflanzenphysiologisch wichtige Jahreszeit Frühling die Dekade 1997–2006 die wärmste der Untersuchungsperiode (Xoplaki et al 2005, aufdatiert). Allerdings ist mit Blick auf die gesamte Periode keine signifikante Häufung von sehr warmen Frühlingen auszumachen. Einzelne sehr warme Jahre im Vergleich mit dem 20. Jahrhundert waren auch um 1800 und zu Beginn des 20. Jahrhunderts zu verzeichnen. So war der Frühling 1987 einer der kühlest des vergangenen Jahrhunderts.

Die rezenten Trends und die Rekonstruktionen der Frühlingstemperaturen bieten die Möglichkeit, den Einfluss des Klimas und der Temperatur im Speziellen auf die Pflanzenwelt zu untersuchen. Gerade für phänologische Phasen sind aber nicht grossräumig, hemisphärisch bis global gemittelte Jahresmitteltemperaturen ausschlaggebend, sondern Temperaturen, die wachstumsphysiologisch bedeutend sind. Oft ist es das saisonal dem Eintreten der Phase vorangehende Mittel oder die Temperatursumme.

Der Einfluss des Klimas auf phänologische Phasen

Die jüngsten regionalen Temperaturveränderungen haben sich in vielen Teilen der Erde auf terrestrische Ökosysteme ausgewirkt (ProClim 2002,

Walther et al 2002, Parmesan & Yohe 2003, Root et al 2003). Die Resultate von 44 regionalen Studien über mehr als 400 Pflanzen und Tiere, die über 20 bis 50 Jahre liefen, zeigen eine Verlängerung der Wachstumsperiode um etwa 1 bis 4 Tage pro Jahrzehnt. Dieser Effekt ist besonders auffällig in höheren Breiten. Die Studien beruhen vor allem auf Beobachtungen aus Nordamerika, Europa und den Polarregionen. In den meisten Fällen, in welchen Veränderungen in biologischen Systemen beobachtet wurden, entspricht das Vorzeichen der Änderung jenem, das aufgrund bekannter Mechanismen erwartet wird: Hohe Spätwinter- und Frühlingstemperaturen führen zu einem verfrühten Einsetzen der Pflanzenaktivität. Die Wahrscheinlichkeit, dass diese Übereinstimmung allein auf Zufall beruht, ist vernachlässigbar gering (ProClim 2002). Deutlich ist das Klimasignal in Frühlingsphasen zu sehen, weil diese besonders sensitiv auf Temperaturveränderungen der Vegetationsperiode als auch von Jahr zu Jahr reagieren (Larcher 2003). Niederschlag hat einen geringen Einfluss und trägt nur wenig zur Erklärung der phänologischen Variabilität bei. Buermann et al (2003) begründen dies mit einem generell ausreichenden Wasserangebot in der Nordhemisphäre, das keinen limitierenden Faktor für die Vegetation darstellt. Korrelationsanalysen zwischen phänologischen und verschiedenen Temperatur- und Niederschlagsmonatsmitteln zeigten für den Niederschlag deutlich tiefere Werte (Holopainen et al 2006). Auch Regressionsanalysen mit schrittweiser Reduktion der Klimaprädiktoren mit Langzeitbeobachtungen in England führten den Niederschlagsparameter nicht in allen phasenspezifischen Modellen ein (Sparks & Carey 1995).

Die Quantifizierung des Temperatureinflusses variiert allerdings. Chmielewski & Rötzer (2002) untersuchten etwa die Temperaturvariabilität auf einen Frühlingsindikator, den sie von vier baumphänologischen Phasen herleiteten. Die gemittelte Februar-Apriltemperatur hatte den grössten Einfluss (Korrelation von -0.83). 1 °C Temperaturerhöhung führt nach ihren Regressionsberechnungen zu einer Verfrühung des Frühlingsindikators von 6.7 Tagen. Tiefe (hohe) Temperaturen führten zu entsprechend spätem (frühem) Einsetzen des phänologischen Indexes. Menzel (2003) untersuchte verschiedene phänologische Phasen von Beobachtungen aus dem Netzwerk des Deutschen Wetterdienstes 1951–2000. Die der jeweiligen phänologischen Phase vorangehenden, einflussreichsten Temperaturmonatsmittelwerte erklärten 65 bis 85 Prozent der jeweiligen Variabilität. Die Phasen würden hier bei einem Grad Temperaturerhöhung um 2.5 bis 6.7 Tage früher eintreten. Der Temperatureinfluss ist auch in Studien aus England (Sparks et al 2000) und Estland sichtbar. 25 Phasen in England – beobachtet zwischen 1891 und 1948 – würden sich bei einem Grad Erhö-

hung um zwei bis zehn Tage verfrühen, in Estland dagegen um 2.6 bis 6.9 Tage mit Daten von 1948–1998 (Ahas et al 2000).

Trendanalysen phänologischer Frühlingsphasen für die letzten 50 Jahre stimmen mit der zu erwartenden Verschiebung zu verfrühten Eintritten als Folge der Temperaturerhöhungen auf europäischer und hemisphärischer Skala überein (Walther et al 2002, Root et al 2003, Schwartz et al 2006). Menzel et al (2006) analysierten über 125 000 phänologische Zeitreihen von 1971–2000 von 542 Pflanzen- und 19 Tierarten aus 21 europäischen Ländern. 78 Prozent der Blattaustriebs-, Blüh- und Frucht reifebeobachtungen haben sich in dieser Periode verfrüht, 30 Prozent signifikant. Nur 3 Prozent der Beobachtungen zeigen in diesem Zeitraum eine Verspätung. Gleichzeitig untersuchten sie auch 254 Temperaturmittelsreihen aus 19 europäischen Ländern, die den phänologischen Ereignissen vorausgehen. Ein Grad Temperaturerhöhung bewirkt im Mittel eine Verfrühtung der Frühlings- und Sommerphasen von 2.5 Tagen. Die phänologischen Phasen und die Temperaturmuster stimmen gut überein ($r=-0.69$, $P<0.001$).

Trendberechnungen und deren Zusammenhang mit phänologischen Auswirkungen stossen aber bei verschiedenen Beispielen an ihre Grenzen. Lineare Trends sind stark von der Länge der gewählten Periode und von extremen Beobachtungen am Anfang und Ende der Periode abhängig. Menzel (2003) zum Beispiel zeigte anhand einer 100-jährigen Kirschenblütenzeitreihe von Geisenheim (Deutschland), dass für die Periode 1982 bis 2000 ein jährlicher, linearer Trend zur Verfrühtung des Eintritts von mehr als einem Tag zu sehen ist. Dieselbe Da-

tenreihe zeigt dagegen für die Periode 1900 bis 2000 eine «bescheidene» Verfrühtung von 0.04 Tagen/Jahr oder 4 Tagen für das ganze Jahrhundert.

Schweizer Trends und regionale Variabilität 1965–2002

Temperatureinfluss- und Trendanalysen der Schweiz stimmen mit den oben genannten Resultaten aus anderen Regionen weitgehend überein (Defila & Clot 2001, 2005). Im Gegensatz zu früheren Studien, die einzelne Phasen und Pflanzen untersuchten, ist es das Ziel der hier beschriebenen Untersuchung, generelle Aussagen zur Entwicklung des Frühlings zu machen, unabhängig von einzelnen Phasen oder Arten (Studer et al 2005). Wir haben deshalb 15 Frühlingsphasen verschiedener Arten ausgesucht und die standardisierten Beobachtungen zu einem Datensatz zusammengefügt. Daraus ergibt sich eine Art statistische Pflanze, der so genannte Frühlings-Index. Die Daten dieser Untersuchung stammen aus dem schweizerischen phänologischen Beobachtungsnetz (Defila 1991, MeteoSchweiz). Heute werden an rund 160 schweizerischen Stationen und an 26 Pflanzenarten 69 Phänophasen beobachtet. Die frühesten Beobachtungen stammen aus dem Jahr 1951. Da nur wenige Datenreihen an allen Stationen soweit zurückreichen und sie viele Lücken aufweisen, verwendeten wir für diese Studie insgesamt 69 Stationen in der Zeitspanne zwischen 1965 und 2002. Um den Einfluss des Klimas abzuschätzen, haben wir Temperatur- und Niederschlagsparameter in die Analyse mit einbezogen. Für die Temperaturen berechneten wir Summen vom 1. Januar bis zum mittleren Eintrittsdatum. Für den Niederschlag summieren wir die Anzahl Tage mit mehr als 3 Millimeter Niederschlag.

Die multivariate Hauptkomponentenanalyse (Bretherton et al 1992) wurde eingesetzt, um die wichtigsten Muster der jährlichen, phänologischen Variabilität zu extrahieren. Der zeitliche Verlauf der ersten Hauptkomponente wurde als robuste Trendabschätzung des Frühlingseintritts (Index) für die Schweiz eingesetzt. Der Einfluss von Temperatur und Niederschlag wurde mit Hilfe von multipler Regression quantifiziert.

Die Entwicklung des zeitlichen Verlaufs des Frühlingseintritts von 1965 bis 1988 zeigt keinen signifikanten phänologischen Trend (Abbildung 2). Dasselbe gilt für die Zeit von 1989 bis 2002, aber das Eintreten der Frühlingsphasen wurde in diesen Jahren generell viel früher registriert. Über die ganze Zeit resultiert daraus ein signifikanter Trend von 1.5 Tagen pro Dekade, der aber hauptsächlich auf der Verschiebung des mittleren Eintrittsdatums um 1988 beruht.

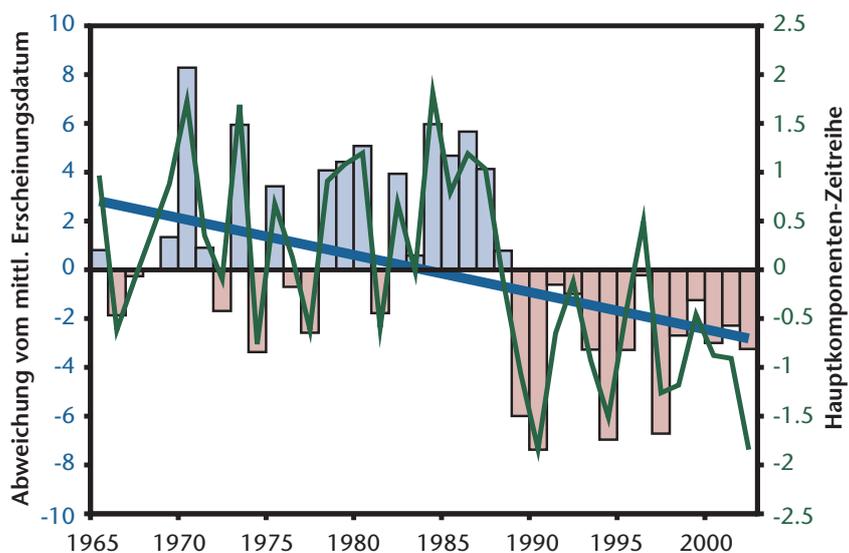


Abb 2 Mittlerer phänologischer Frühlingsbeginn aller 69 phänologischen Stationen der Schweiz 1965–2002 (Säulen) und standardisierte erste Hauptkomponenten-Zeitreihe der Wachstumstage (Growing Degree Days [GDD] > 4 °C, grüne Kurve). Linke Skala: Abweichung vom mittleren Erscheinungsdatum in Tagen. Rechte Skala: Standardisierte erste Hauptkomponenten-Zeitreihe. Der phänologische Trend ist 1.5 Tage/Dekade (blaue Gerade) (Studer et al 2005).

2 <http://www.meteoschweiz.ch> (16. März 2007)

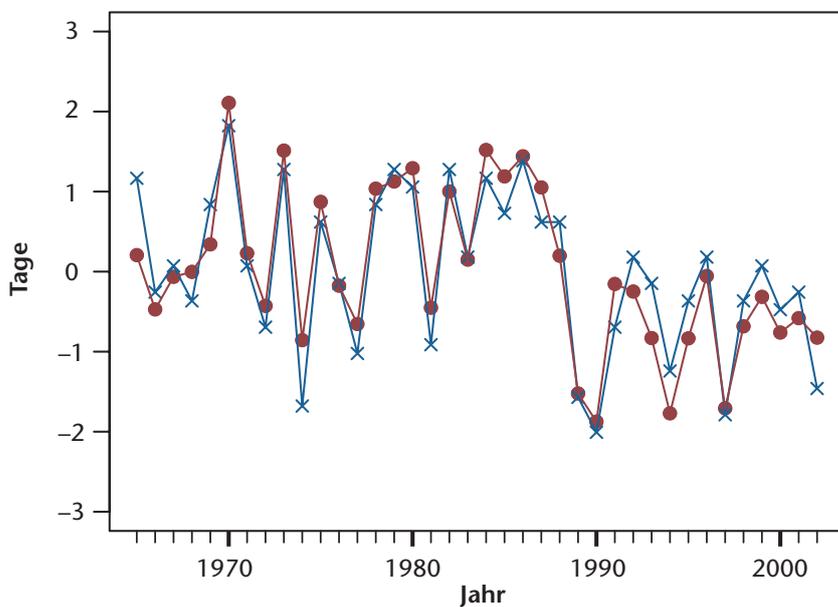


Abb 3 Frühlingsindex (rot; Studer et al 2005) und Kirschenblüte (blau; Rutishauser 2003) von 1965–2002. Standardisierte Abweichungen.

Sehr deutlich kommt in dieser Abbildung auch der starke Zusammenhang zwischen Phänologie und Temperatur zum Ausdruck. Frühe Eintrittsdaten wurden in Jahren mit warmen Winter- und Frühlingstemperaturen registriert ($r = -0.94$; $p < 0.01$).

Das Hauptmuster der phänologischen Entwicklung wird hingegen nicht deutlich durch den Niederschlag beeinflusst ($r = 0.28$; $p = 0.09$, nicht gezeigt). Dieser hauptsächlich Temperatur bestimmte Trend entspricht den Resultaten aus zwei globalen Studien (Parmesan & Yohe 2003, Root et al 2003).

Nach Entfernung der wichtigsten, Temperatur gesteuerten Komponente treten räumliche Unterschiede und der Einfluss des Niederschlags hervor (Studer et al 2005). Die Auswertung der zweiten Hauptkomponente zeigt, dass der Trend hin zu früherem Frühlingsbeginn räumliche Variabilität aufweist. In tieferen Lagen ist die Verfrühung demnach eher stärker als in höher gelegenen Gebieten. Zudem ist auch ein Nord-Süd Unterschied feststellbar. Auf der Alpennordseite sind die Trends eher stärker als auf der Alpensüdseite. Regressionsanalysen haben gezeigt, dass dieses Muster ebenfalls stark durch die Temperatur beeinflusst wird, aber auch der Niederschlag trägt signifikant zur Erklärung der räumlichen Variabilität bei.

Diese regionalen Unterschiede zeigen uns, dass der Frühlingsindex, der aus dem ersten Hauptmuster der Hauptkomponentenanalyse abgeleitet wird, den Trend in tieferen Lagen sowie auf der Alpennordseite leicht unterschätzt und für die Alpensüdseite und für höhere Lagen eher zu starke Trends ergibt.

Die oben gezeigten, systematischen Untersuchungen reichen nur rund 40 Jahre zurück. Der Vergleich des Indexes aus der multivariaten Analyse mit

einzelnen Phasen macht eine Verlängerung der Datengrundlage möglich. Abbildung 3 zeigt die zeitliche Entwicklung des Indexes und der Blüte der Kirsche von 1965–2002. Die Einzelphase (Kirschenblüte) kann die Variabilität des robusten Mulispezies-Index erfassen. Extrem frühe (1974, 1989, 1990) und späte Jahre (1970, 1973) werden auch von der Einzelphase gut abgebildet. Zudem wird auch die Mittelwertverschiebung am Ende der 1980er-Jahre sichtbar.

Entwicklung über Jahrzehnte und Jahrhunderte: Historische Phänologie

Weil Einzelphasen robuste Indizes abzubilden vermögen, ermöglichen historische Zeitreihen an Einzelstandorten und ein Reichtum vielfältiger historischer phänologischer Beobachtungen eine Analyse der beobachteten Entwicklung der Frühlingsvegetation der vergangenen 300 Jahre. Historische phänologische Beobachtungen entstanden ausserhalb von Beobachtungsprogrammen, in welchen phänologische Phasen in Form von Anleitungen definiert und an die Beobachter abgegeben werden.

Seit dem Mittelalter liegen bruchstückhafte Aufzeichnungen vor. Die Ökonomische Gesellschaft von Bern initiierte 1759 ein erstes Netzwerk (Pfister 1975, 1984).³ Während der ersten Jahre des 1864 gegründeten meteorologischen Netzwerkes wurden auch regelmässig phänologische Beobachtungen gemacht und publiziert (SMB 1864–1873). 1869 bis 1882 erhob der Bernische Forstdienst phänologische Waldbeobachtungen (Zschokke 1891, Vassella 1997). Die langen Reihen des Kastanienblattausbruchs in Genf seit 1808 und der Vollblüte des Kirschbaums in Liestal seit 1894 sind zwei phänologische Reihen, die bis heute fortgesetzt werden und mit den heutigen Netzwerkbeobachtungen verglichen werden können (Defila & Clot 2001).

Historische Beobachtungen schliessen unabhängige Beobachter, so genannte «closet phenologists», und historische Quellen ein. Pfister⁴ definiert die historische Phänologie als «beobachtete, saisonal wiederkehrende Ereignisse in der natürlichen Umwelt, die im Zusammenhang mit Beschreibungen und instrumentellen Messungen aufgezeichnet worden sind». Diese Beschreibung umfasst sowohl klassisch pflanzenphänologische Phasenbeobachtungen, wie sie heute gemacht werden, als auch

3 Im Forschungsprojekt «Nützliche Wissenschaft, Naturaneignung und Politik. Die Ökonomische Gesellschaft Bern im europäischen Kontext (1750-1850)» werden auch die phänologischen Beobachtungen untersucht. <http://www.oeg.hist.unibe.ch> (16. März 2007).

4 in Vorbereitung

«para-phänologische» Phasen aus der Landwirtschaft wie Aussaat- und Erntedaten. Zudem werden eine Vielzahl anderer Beobachtungen der physischen Umwelt wie Schneefall, Schnee- und Eisbedeckung oder Nebel dokumentiert. Der Unterschied zwischen historischer und moderner Phänologie liegt dabei im Kontext, in dem solche Beobachtungen angestellt worden sind. Historischen Beobachtungen wird ein noch grösserer Teil an Subjektivität zugesprochen als den Netzwerkbeobachtungen nach Anleitungen und Phasendefinitionen. Trotzdem können nach gründlicher, kritischer Analyse der Dokumente in vielen Fällen qualitativ hoch stehende Daten gewonnen werden, die trotz systematischer Unterschiede die Variabilität der phänologischen Veränderungen festzuhalten vermögen.

Kirschenblüte im Schweizer Mittelland seit 1721

Die Integration und Homogenisierung von Beobachtungen der Kirschenblüte für das Schweizer Mittelland stellt einen ersten Versuch dar, historische Beobachtungen mit rezenten zu vergleichen (Rutishauser 2003). Abbildung 4 zeigt die Beobachtungen der Kirschenblüte für das Schweizer Mittelland zurück ins Jahr 1721 sowie die aus mittleren Februar-April-Monatsmitteltemperaturen statistisch rekonstruierten Blühdaten. Die lange Beobachtungsreihe der Kirschenblüte besteht aus 14 unabhängigen Teilperioden. Für zwei Teilperioden stehen Netzwerkbeobachtungen zur Verfügung, die zu einem jährlichen Mittelwert zusammengefasst werden. Damit werden mikroklimatische und sortenspezifische Unterschiede vermindert. In der Periode 1951–2000 können die jährlichen Mittelwerte mit einer unab-

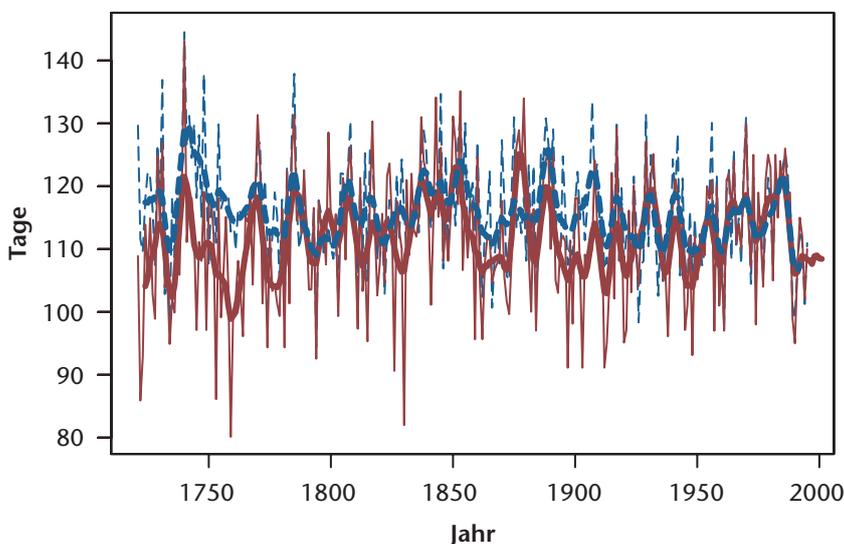


Abb 4 Beobachtete (rot) und statistisch rekonstruierte (blau; 1721–1995) Blüte der Kirsche im erweiterten Schweizer Mittelland von 1721–2003. Dicke Linien zeigen das gefilterte 9-jährige Mittel (Rutishauser 2003).

hängigen Einzelreihe (Liestal) verglichen werden. Systematische Unterschiede in den jeweiligen Reihen können regionalklimatisch und auf Grund der jeweiligen phänologischen Phasendefinition erklärt werden. Infolge der Höhenabhängigkeit der Kirschenblüte werden die Einzelbeobachtungen auf das Referenzniveau der mittleren Beobachtungsstation des Schweizerischen Phänologischen Netzwerkes (550 m/M.; 21 Stationen) referenziert und mit einem Höhengradienten von 2.5 Tagen pro 100 Höhenmeter korrigiert (Rutishauser 2003).

Die der Blüte vorausgehende Temperatur ist aus pflanzenphysiologischer Sicht der wichtigste, die Kirschenblüte beeinflussende Umweltfaktor. Für die Periode 1951–2000 wird die entscheidende Zeitperiode durch den Vergleich der Kirschenblüte mit unterschiedlichen Monats- und kombinierten Monatsmitteltemperaturen bestimmt. Die durchschnittlichen Februar–April–Temperaturen sind mit dem mittleren Kirschenblüte des Mittellandes ($r = -0.82$) am stärksten korreliert. Das negative Vorzeichen weist auf den physikalischen Zusammenhang von Blüte und Temperatur hin. Aufgrund dieser Zusammenhänge kann ein lineares Regressionsmodell erstellt werden, das die Kirschenblüte (Prädiktand) aus europäischen Monatsmitteltemperaturen (Prädiktoren) zurück ins Jahre 1721 schätzt. Über die ganze Untersuchungsperiode korrelieren beobachteter und rekonstruierter Blühbeginn mit $r = 0.61$. Allein die Frühlingstemperaturen erklären damit über ein Drittel der jährlichen Variabilität. Das mittlere Datum der beobachteten Kirschenblüte 1721–2000 ist am 21. April (Tag 111) mit einer Standardabweichung von 10 Tagen. Für das statistisch rekonstruierte Datum 1721–1995 liegt der Mittelwert am 26. April mit einer Standardabweichung von 5 Tagen. Systematische Unterschiede zwischen den beiden Reihen vor 1900 liegen in den Differenzen in den Definitionen der phänologischen Phase, aber auch in den Unsicherheiten der Rekonstruktionsmethode sowie der systematischen Abnahme der Temperaturprädiktoren begründet.

Der Zusammenhang ist allerdings über die Zeit nicht stabil. Für 1951–1995 zeigt die Korrelation 0.84, wogegen einzelne Perioden im 19. Jahrhundert nicht signifikant korrelieren. Gleitende 31-jährige Korrelationskoeffizienten nach Pearson dienen zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen dem Blühbeginn der Kirsche und den Klimaparametern (Abbildung 5). Die langjährige Reihe zeigt, dass alle Werte innerhalb des 99%-Signifikanzbereichs liegen, der mit Hilfe von Monte Carlo Simulationen bestimmt worden ist. In drei Zeitfenstern liegt der gleitende Korrelationskoeffizient aber nur knapp über der Signifikanzschwelle: Während das Zeitfenster 1827–1845 auf weniger zuverlässige Beobachtungsqualität zurückzuführen ist, scheint es möglich, dass die beiden anderen Teilperioden

(1755–1765, 1885–1895) auf einen geringeren Einfluss der Temperatur auf die Kirschenblüte zurück geführt werden können (Rutishauser 2003).

Viele Unterschiede zwischen der beobachteten und der aus Temperaturmessungen rekonstruierten Kirschenblütenreihe können mit Hilfe der historischen Originaldokumente und den aus der Quellenanalyse stammenden Informationen erklärt werden.

Schlussfolgerungen

Die Kombination verschiedener Arten in einen phänologischen Index und die multivariate Auswertung erwiesen sich als geeigneter Ansatz, um die zeitlichen und räumlichen Hauptmuster der Frühlingsphänologie zu erfassen und die Entwicklung des Frühlingsanfangs in der Schweiz zu beschreiben. Diese multivariate Methodik könnte auch für grossräumigere Studien geeignet sein, weil die Aussagen zur Frühlingsentwicklung nicht von spezifischen Arten abhängig sind. Andererseits zeigte der Vergleich eines Index-Wertes mit der einzelnen Phase der Blüte des Kirschbaums, dass eine Verlängerung der Beobachtungsreihe um mehrere Jahrhunderte eine einzigartige Möglichkeit darstellt, den Klimaeinfluss über längere Zeitperioden zu untersuchen. Rutishauser et al⁵ haben das Index-Prinzip aufgenommen und präsentieren eine Rekonstruktion des Frühlingsanfangs bis 1702.

Die phänologischen Beobachtungen in der Schweiz in einem Netzwerk während der vergangenen 50 Jahre und die historischen Beobachtungen

⁵ in Vorbereitung

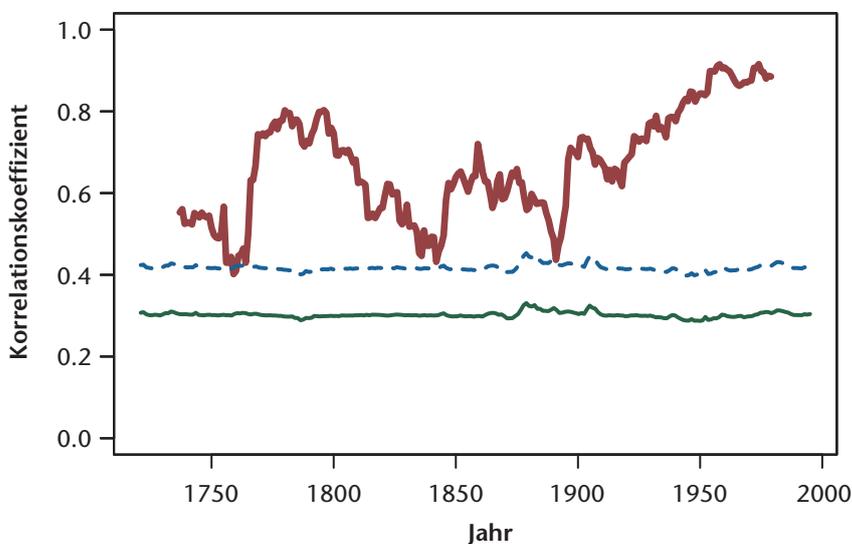


Abb 5 Gleitende Korrelationskoeffizienten nach Pearson über 31 Jahre zwischen der beobachteten und rekonstruierten Blüte des Kirschbaums 1721–1995. Die blaue (grüne) Linie zeigt das 99%- (95%-) Signifikanzniveau nach 1000 Monte-Carlo-Simulationen (Rutishauser 2003).

der vergangenen 300 Jahre bieten eine hervorragende Grundlage für differenzierte Klimaimpaktforschung. Die erwarteten Erwärmungen für das 21. Jahrhundert werden die Variabilität der Frühlingsphänologie weiter verändern. Es bleibt offen, wie stark und bis zu welchem Ausmass dies geschehen wird. Auf jeden Fall werden die Analyse vergangener Veränderungen und die laufenden gegenwärtigen Beobachtungen zum Verständnis und für die Modellierung zukünftiger Prozesse beitragen.

Dank

T. R. dankt Heinz Wanner, Jürg Luterbacher, Christian Pfister, François Jeanneret und Claudio Defila für die Betreuung der Diplomarbeit. ■

Literatur

- AHAS R, JAAGUS J, AASA A (2000) The phenological calendar of Estonia and its correlation with mean air temperature. *Int J Biometeorol* 44: 159–166.
- BRETHERTON CS, SMITH C, WALLACE JM (1992) An intercomparison of methods for finding coupled patterns in climate data. *J Clim* 6: 541–560.
- BUERMANN W ET AL (2003) Interannual covariability in Northern hemisphere air temperatures and greenness associated with El Niño-Southern oscillation and the arctic oscillation. *J Geophys Res* 108 (D13): 4396. doi:10.1029/2002JD002630
- CHMIELEWSKI FM, RÖTZER T (2001) Response of tree phenology to climate change across Europe. *Agric For Meteorol* 108: 101–112.
- CHRISTIDIS N, STOTT PA, BROWN S, KAROLY DJ, CAESAR J (2007) Human contribution to the lengthening of the growing season during 1950–1999. *J Clim*, accepted.
- DEFILA C (1991) Pflanzenphänologie der Schweiz. Zürich: Schweiz Meteorol Anst, Veröff 50. 235 p.
- DEFILA C, CLOT B (2001) Phytophenological trends in Switzerland. *Int J Biometeorol* 45: 203–207.
- DEFILA C, CLOT B (2005) Phytophenological trends in the Swiss Alps, 1951–2002. *Meteorol Z* 14: 191–196.
- HOLOPAINEN J, HELAMA S, TIMONEN M (2006) Plant phenological data and tree-rings as paleoclimate indicators in south-west Finland since AD 1750. *J Biometeorol* 51: 61–72.
- MCCARTHY ET AL, EDITORS (2001) *Climatic change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability*. Cambridge: Cambridge Univ Press. 1032 p.
- HANSEN JE ET AL (2001) A closer look at United States and global surface temperature change. *J Geophys Res* 106: 23947–23963. doi:10.1029/2001JD000354
- LARCHER W (2003) *Physiological plant ecology*. Berlin: Springer, 4 ed, 513 p.
- MANN M, BRADLEY RS, HUGHES MK (1999) Northern hemisphere temperatures during the past millennium: Inferences, uncertainties, and limitations. *Geophys Res Lett* 26: 759–762.
- MENZEL A (2002) Phenology: Its importance to the global change community. *Clim Chang* 54: 379–385.

- MENZEL A (2003) Plant phenological anomalies in Germany and their relation to air temperature and NAO. *Clim Chang* 57: 243–263.
- MENZEL A (2003) Plant phenological 'fingerprints'. In: Schwartz MD, editor. *Phenology. An integrative environmental science*. Dordrecht: Kluwer. pp. 319–329.
- MENZEL A ET AL (2006) European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Glob Chang Biol* 12: 1969–1976.
- MOBERG A, SONECHKIN D, HOLMGREN K, DATSENKO N, KARLEN W (2005) Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low- and high-resolution proxy data. *Nature* 433: 613–617.
- MYNENI RB, KEELING CD, TUCKER CJ, ASRAR G, NEMANI RR (1997) Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature* 386: 698–702.
- PARMESAN C, YOHE G (2003) A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature* 421: 37–42.
- PFISTER C (1975) Agrarkonjunktur und Witterungsverlauf im westlichen Schweizer Mittelland zur Zeit der Ökonomischen Patrioten 1755–1797. Bern: Geogr Inst Univ Bern, Geogr Bern G2. 229 p.
- PFISTER C (1984) *Klimageschichte der Schweiz 1525–1860*. Das Klima der Schweiz von 1525–1860 und seine Bedeutung in der Geschichte von Bevölkerung und Landwirtschaft. Bern: Academica Helvetica. 184 p.
- PROCLIM (2002) *Klimaänderung 2001*. Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderung (Intergovernmental Panel on Climate Change). Bern: Forum für Klima und Global Change. 119 p.
- REYNOLDS RW, RAYNER NA, SMITH TM, STOKES DC, WANG W (2002) An improved in situ and satellite SST analysis for climate. *J Clim* 15: 1609–1625 doi:10.1175/1520-0442(2002)015<1609:AISAS>2.0.CO;2.
- ROOT T ET AL (2003) Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature* 421: 57–60.
- RUTISHAUSER T (2003) Cherry tree phenology. Interdisciplinary analyses of phenological observations of the cherry tree in the extended Swiss plateau region and their relation to climate change. Bern: Geogr Inst Univ Bern, Diplomarbeiten. 123 p.
- SCHWARTZ MD, AHAS R, AASA A (2006) Onset of spring starting earlier across the Northern Hemisphere. *Glob Chang Biol* 12: 343–351.
- SMB (1864-1873) Schweizerische Meteorologische Beobachtungen. Zürich: Rudolf Wolf, Meteorol Centralanst Schweiz Naturforsch Gesell.
- SPARKS TH, CAREY PD (1995) The response of species to climate over two centuries: an analysis of the Marsham phenological record, 1736–1947. *J Ecol* 83: 321–329.
- SPARKS TH, JEFFREE EP, JEFFREE CE (2000) An examination of the relationship between flowering times and temperature at the national scale using long-term phenological records from the UK. *Int J Biometeorol* 44: 82–87.
- STUDER S, APPENZELLER C, DEFILA C (2005) Inter-annual variability and decadal trends in Alpine spring phenology: A multivariate approach. *Clim Chang* 73: 395–414.
- STUDER S, STÖCKLI R, APPENZELLER C, VIDALE PL (2007) A comparative study linking satellite phenology to ground observed phenology. *Int J Biometeorol*. doi:10.1007/s00484-006-0080-5
- VASSELLA A (1997) Phänologische Beobachtungen des Bernischen Forstdienstes von 1869 bis 1882. Witterungseinflüsse und Vergleich mit heutigen Beobachtungen. Bern: Bundesamt Umwelt Wald Landschaft, Umweltmaterialien 73. pp. 9–75.
- WALTHER G ET AL (2002) Ecological responses to recent climate change. *Nature* 416: 389–395.
- XOPLAKI E ET AL (2005) European spring and autumn temperature variability and change of extremes over the last half millennium. *Geophys Res Lett* 32: L15713.
- ZSCHOKKE A (1891) *Ergebnisse der Beobachtungen an den im Kanton Bern zu forstlichen Zwecken errichteten meteorologischen Stationen*. Mitt Schweiz Zentralanst forstl Versuchsw 1: 157–190.

Klimawandel und der Einfluss auf die Frühlingsphänologie

Die globalen Frühlingstempertrends (März–Mai) für 1951–2006 sind in den meisten Regionen der Erde gestiegen. In Europa war der Frühling, die pflanzenphysiologisch relevante Jahreszeit, in den Jahren 1997–2006 die wärmste Dekade der vergangenen 500 Jahren. Eine Temperaturerhöhung von einem Grad würde phänologische Frühlingsphasen je nach Pflanzenart und Region um 2 bis 10 Tage verfrühen. Ein Frühlingsindex, in den verschiedene Pflanzenarten einfließen, hat sich als geeignetes Mittel zur Abschätzung einer allgemeinen Entwicklung des Frühlingsanfangs in der Schweiz während der letzten rund 40 Jahre erwiesen. Für die letzten Jahrzehnte konnte ein mittlerer Verfrühungstrend von 1.5 Tagen/Dekade festgestellt werden. Die 280-jährige Reihe der beobachteten Kirschenblüte für das Schweizer Mittelland verlängert die Beobachtungsgrundlage und stellt eine einzigartige Möglichkeit dar, den Einfluss von Klimaparametern auf die Frühlingsphänologie der Jahrhunderte zu analysieren.

Changement climatique et influence sur la phénologie printanière

Pour la période 1951–2006, les tendances globales des températures printanières (mars à mai) ont augmenté dans la plupart des régions de la Terre. Sur le plan européen, le printemps – la saison physiologiquement décisive pour les plantes – accuse pour la décade 1997–2006 les conditions les plus chaudes des 500 dernières années. Une augmentation des températures d'un degré accélère le développement phénologique, selon les plantes et les régions, de 2 à 10 jours. Un indice de printemps comprenant différentes espèces végétales s'est révélé comme le moyen adéquat pour l'estimation du développement général du début du printemps au cours des 40 dernières années en Suisse. Pour les dernières décennies, une tendance à l'accélération moyenne de 1.5 jours par décade peut être constatée. La série de 280 ans de la floraison des cerisiers observée sur le Plateau suisse prolonge la base statistique des données et elle représente une possibilité unique d'analyser l'influence des paramètres climatiques sur la phénologie printanière au cours des siècles.