

Historical Phenology – Plant Phenological Reconstructions and Climate Sensitivity in Northern Switzerland

Inauguraldissertation
der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät
der Universität Bern

vorgelegt von

This Rutishauser

von Langrickenbach TG

Leiter der Arbeit:
Prof. Dr. H. Wanner
Geographisches Institut, Universität Bern

Von der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät angenommen.

Bern, den 6. Dezember 2007

Der Dekan:

Prof. Dr. P. Messerli

To my family



[...] experientia enim optima est in omnibus talibus magistra.

Albertus Magnus (1193/1206–1280)

Picture previous page: Spatial distribution of trends in May–August photosynthetic activity across the northern high latitudes 1981–2005. Significant positive trends in P_g are shown in green, negative trends in rust.
From Bunn, A. et al. (2007): Northern High-Latitude Ecosystems Respond to Climate Change, EOS 88 333–340.

Abstract

The major focus of the PhD thesis '*Historical Phenology – Plant Phenological Reconstructions and Climate Sensitivity in Northern Switzerland*' lies on the analysis of plant phenological observations and plant phenological sensitivity to climate change in Switzerland. During the past five decades winter and spring warming trends have led to significant advance of the spring phenology of many species and phases. Furthermore, the extraordinary warm autumn 2006 and spring 2007 left their imprint on plant phenology: some plant species had a partial second flowering at the end of the year or extended the flowering until the beginning of winter, and species that typically flower in early spring flowered distinctly earlier after the winter 2007 (Chapter 6). As temperatures are predicted to increase, there is need to understand and quantify climate impacts on plant phenology in the present and in the past.

Back in time phenological observations become scarce. However, a large number of historical observations were recovered and published in Switzerland. In consequence, this thesis tackles the questions of the availability of historical phenological observations for spring and summer seasons of the past three to five centuries and develops methods for their analysis. Historical phenological observations have been known such as the unique collection of more than 4'000 plant and animal phenological observations by the priest Johann Jakob Sprüngli (1717–1803). The chapter 3, *Johann Jakob Sprüngli – pioneer of systematic plant observations and precursor of historical climatology in Europe*, exemplifies the value of historical phenology. It contributes to a first definition of historical phenology that is the art of the interpretation of phenological observations that were collected before or simultaneously with networks or proto-networks and contain individual, characteristic meta-information. (Chapters 1 and 9)

The methodological part of this thesis addresses the development of statistical plants derived from observations of the most recent decades in order to overcome limited data availability. Subsequently, a method is introduced to reconstruct statistical plants for centuries back in time. Additionally, we test several tools for the assessment of climate impacts on phenological observations and the change throughout time such as a moving window on linear trends, correlation and sensitivity as well as a Bayesian time series modeling and correlation approach. By statistically linking longterm phenological observations to the environmental forcing we attempt to contribute to a better understanding of present and future phenological modeling.

In the following I present the most important findings of each chapter. The chapter *Climate change and its influence on spring phenology* shows that spring season (March–May) temperature trends 1951–2006 are positive in most regions of the world with 1997–2006 being the warmest decade in Europe

with respect to the past 500 years. The warming has had a strong impact on phenological trends in Switzerland and lead to a general advance of 1.5 days/decade in the period 1965–2002 represented by a multi-species index based on 15 selected phases and calculated by means of empirical orthogonal function analysis (Chapter 2). Similar impacts are found for a statistical 'Spring plant' based on three selected species and the flowering of the cherry tree in the Swiss Plateau region. Thus, we argue that single phenological phases can represent regional trends (Chapter 2).

Subsequently, we present longterm records from historical phenological observations. First, a 280-year long record of the flowering of the cherry tree for the extended Swiss Plateau region during the period 1721–2000 was compiled from 14 independent records. Individual records were altitude corrected to a common reference level (Chapter 2). Second, the chapter *A phenology-based reconstruction of inter-annual changes in past spring seasons* presents a 305-year long statistical 'Spring plant' record as the weighted mean of the flowering of the cherry and apple tree and beech budburst. It was reconstructed for the extended Swiss Plateau region 1702–2006 based on network and historical phenological observations (Chapter 4). Third, a 527-year long time series of grape harvest dates of the Swiss Plateau region was compiled from 1435 single observations for the period 1480–2006 in the chapter *Grape Harvest Dates as a proxy for Swiss April to August Temperature Reconstructions back to AD 1480* (Chapter 5). In addition, observations of the 'Sofortmeldenetz' of the Swiss Phenological Network were used for immediate analysis of the record spring 2007 observations in Switzerland resulting in a preliminary update of the 'Spring plant' (Chapter 6).

Selected results of environmental sensitivity show an observed advance of phenological events of 2–10 days for a general increase of 1°C in spring for the period 1950–2000 (Chapter 2). Explicitely, the chapter *Exceptional European warmth of autumn 2006 and winter 2007: Historical context, the underlying dynamics, and its phenological impacts* indicates that hazel (snowdrop) flowering responds to 1°C warmer February by 11.3 days (8.3) earlier flowering in Germany (Chapter 6). For Swiss grape harvest dates we found that twelve days of grape harvest difference correspond to around 1°C April–August temperature difference. The chapter *Swiss Spring Plant Phenology 2007: Extremes, a multi-century perspective and changes in temperature sensitivity* introduces changing sensitivity by a moving linear regression approach and shows significant changes of the Swiss 'Spring plant' to spring temperatures of 6 days change/degree°C (1950-1980) to 4 days/degree°C (1975-2005). The extraordinarily positive spring temperature anomalies of western central Europe were measured in spring 2007 and lead to 94 new record early observations which were recorded for selected phases and stations in Switzerland. Furthermore, we investigate the relationship between phenology and forcing temperatures with a nonlinear Bayesian correlation approach. The chapter *Time series modelling and temperature impact assessment of phenological records in the last 250 years* indicates that spring phenological variability is not only influenced by spring temperatures of the current year but also by summer temperatures of the preceding growing season.

In conclusion, we present three longterm phenological observation records of the Swiss Plateau region for the past three to five centuries with reconstruction methods, associated uncertainties, extremes, trends and climate sensitivity analyses. Additional modeling approaches are presented in chapters 1 and 10. This PhD thesis underlines the importance of observed phenological evidence of the past to assess the impact of changing climate and address the questions of possible future scenarios in time.

Zusammenfassung

Der Schwerpunkt der Dissertation *Historische Phänologie – Pflanzenphänologische Rekonstruktionen und ihre Klimasensitivität in der Schweiz* liegt einerseits auf der Analyse historischer pflanzenphänologischer Beobachtungen. Andererseits soll der Einfluss des Klimas auf die phänologische Variabilität in der Schweiz während der vergangenen Jahrhunderte untersucht werden. Erwärmungstrends der Winter- und Frühlingstemperaturen in den vergangenen fünf Jahrzehnten haben zu einer signifikanten Verfrühung der Frühlingsphänologie vieler Arten und Phasen geführt. Vor allem die aussergewöhnlich hohen Temperaturen in Herbst 2006 und Winter 2007 hinterliessen deutliche Spuren in der Pflanzenwelt: Gegen Ende des Jahres 2006 zeigten einzelne Pflanzenarten ein zweites Blühen oder verlängerten die Blühphase bis in den Winter. Viele Arten, die normalerweise im Frühjahr blühen, blühten signifikant früher und bereits Ende Winter. Weiter steigende Temperaturen drängen dazu, Klimaeinflüsse auf die Pflanzenphänologie besser zu verstehen und zu quantifizieren.

In der Vergangenheit nimmt die Zahl der phänologischen Beobachtungen allerdings stark ab. Trotzdem wurden in der Schweiz viele historische phänologische Beobachtungen aus den Archiven geborgen und publiziert. Deshalb beschäftigt sich diese Dissertation mit der Frage der Häufigkeit von frühlings- und sommerphänologischen Beobachtungen der vergangenen drei- bis fünfhundert Jahre und Methoden für deren Analyse. Historische phänologische Beobachtungen sind schon lange bekannt, wie etwa die Sammlung von mehr als 4000 pflanzen- und tierphänologischen Beobachtungen von Pfarrer Johann Jakob Sprüngli (1717–1803). Das Kapitel *Johann Jakob Sprüngli – europäischer Pionier der systematischen Pflanzenbeobachtung und Wegbereiter der historischen Klimaforschung* zeigt exemplarisch den wissenschaftlichen Wert der historischen Phänologie auf. Seine Beobachtungen tragen zu einer ersten Definition für historische Phänologie bei. Historische Phänologie ist in dieser Arbeit erstmals definiert als das Handwerk, phänologische Beobachtungen zu interpretieren, die ausserhalb oder vor phänologischen Netzwerken entstanden sind und individuelle, charakteristische Metainformationen enthalten.

Methodische Ansätze dieser Arbeit umfassen die Definition und Herleitung von statistischen Pflanzen abgeleitet von aktuellen Beobachtungen, womit der kleiner werdenden Anzahl von Beobachtungen in der Vergangenheit Rechnung getragen werden kann. Anschliessend wird eine Methode zur Rekonstruktion einer 'statistischen Frühlingspflanze' der vergangenen Jahrhunderte vorgestellt. Schliesslich wird der Einfluss des Klimas auf die Pflanzenphänologie oder die Sensitivität pflanzenphänologischer Phasen mit der Methode 'gleitender Fenster' für linearen Trend, Korrelation und Regression angewendet. Der Zusammenhang zwischen Temperatur und Phänologie wird in einem letzten Schritt mit Hilfe Bayes'scher Statistik beschrieben. Mittels statistischer Analyse von Umweltfaktoren und

phänologischen Beobachtungen streben wir bessere Grundlagen für die phänologische Modellierung der Gegenwart und der Zukunft an.

Die wichtigsten Resultate der einzelnen Kapitel sind hier kurz zusammengefasst. Das Kapitel *Klimawandel und der Einfluss auf die Frühlingsphänologie* zeigt, dass die Frühlingstemperaturtrends (März bis Mai) zwischen 1951 und 2006 in den meisten Regionen der Erde positiv waren. Die Jahre von 1997 bis 2006 waren gar das wärmste Jahrzehnt der vergangenen 500 Jahre. Die Erwärmung hatte einen grossen Einfluss auf die Frühlingsphänologie der Schweiz und führte zu einem allgemeinen Verfrühungstrend von 1.5 Tagen/Dekade in den Jahren 1965 bis 2002. Dieser Trend basiert auf einem Mehrphasen-Frühlingsindex von 15 phänologischen Phasen, die die jährliche Variabilität mit Hilfe von empirischen Orthogonal funktionsanalysen beschreiben (Kapitel 2). Ähnliche Einflüsse wurden für eine 'statistische Frühlingspflanze' basierend auf drei ausgewählten Arten (Kapitel 4) und für die Vollblüte der Kirsche im Schweizer Mittelland gefunden (Kapitel 2). Daraus folgern wir, dass einzelne phänologische Phasen den Trend einer Region repräsentieren können.

In der Folge werden drei lange phänologische Reihen vorgestellt, die aus historischen phänologischen Beobachtungen rekonstruiert worden sind. Die 280-jährige Beobachtungsreihe der Vollblüte der Kirsche für das Schweizer Mittelland von 1721 bis 2000 enthält 14 unabhängige Beobachtungsreihen verschiedener Standorte, die auf ein gemeinsames Referenzniveau korrigiert worden sind (Kapitel 2). Das Kapitel *Eine phänologie-basierte Rekonstruktion der jährlichen Frühlingsvariabilität* zeigt die 305-jährige Reihe der 'statistischen Pflanze' im Schweizer Mittelland von 1702 bis 2006, die aus Kirschen-, Apfel- und Rebenblüte und aus dem Blattaustrieb der Buche rekonstruiert worden ist (Kapitel 4). Die 527-jährige Reihe der Rebenerntedaten im Schweizer Mittelland von 1480 bis 2006 wurde aus 1435 einzelnen Beobachtungen zusammengefasst und wird im Kapitel 4 *Rebenerntedaten als Proxy für die Rekonstruktion der April- und Augusttemperaturen zurück bis 1480* beschrieben. Zusätzlich wurden Beobachtungen des 'Sofortmeldenetzes' des Schweizerischen Phänologischen Netzes verwendet, um die Ereignisse des aktuellen Frühlings 2007 zu beschreiben und die 'statistische Frühlingspflanze' provisorisch aufzudatieren (Kapitel 7).

Weitere Resultate zeigen, dass eine Erhöhung der Temperaturen um 1°C zu einer Verfrühung der frühlingsphänologischen Phasen von 2 bis 10 Tagen je nach Pflanzenart, Phase und Region führt. Das Kapitel *Aussergewöhnlich warmer Herbst 2006 und Winter 2007 in Europa: Historischer Kontext, die dynamischen Ursachen und der Einfluss auf die Phänologie* zeigt eine Verfrühung von Hasel und Schneeglöckchen um 11.3 beziehungsweise 8.3 Tagen bei ein Temperaturerhöhung von 1°C für 1951 bis 2007 in Deutschland (Kapitel 6). Für das Datum der Rebenernte in der Schweiz bedeutet ein Grad Temperaturerhöhung eine Verfrühung der Ernte um 12 Tage (Kapitel 5). Das Kapitel *Schweizer Frühlingsphänologie 2007: Extreme, Jahrhundertperspektive und Veränderungen der Temperatursensitivität* zeigt anhand von gleitenden Regressionsberechnungen eine signifikante Veränderung der Temperatursensitivität der 'statistischen Frühlingspflanze' auf Frühlingstemperaturen zwischen 1950–1980 und 1975–2005. In der früheren Periode verfrühte sich der Frühling um 6 Tage bei 1°C Temperaturerhöhung, in der späteren Periode nur um vier Tage/°C. In der Folge zeigt das Kapitel *Zeitreihenmodellierung und Temperatureinflussanalyse von phänologischen Zeitreihen der vergangenen 250 Jahre* den langfristigen Zusammenhang zwischen Phänologie und Temperaturforcing anhand eines Bayes'schen Korrelationsansatzes. Daraus folgt, dass die Frühlingsphänologie nicht nur von der aktuellen, sondern auch von der Vorjahressommertemperatur beeinflusst wird (Kapitel 8).

Schliesslich sei darauf verwiesen, dass die aussergewöhnlich hohen Frühlingstemperaturen 2007 zu 94 neuen Rekorden für eine ausgewählte Anzahl Stationen und Phasen der Schweiz geführt haben (Kapitel 8).

Zusammenfassend gilt, dass drei lange phänologische Reihen für das Schweizer Mittelland in den vergangenen Jahrhunderten, sowie die angewendeten Rekonstruktionsmethoden, Rekonstruktionsunsicherheiten, Extreme, Trends und Klimasensitivitäten gezeigt worden sind. Modellierungsansätze werden in den Kapiteln 1 und 10 vorgestellt. Die vorliegende Dissertation unterstreicht den Wert historischer phänologischer Beobachtungen als Zeuge vergangener Veränderungen und zum angemessenen Verständnis gegenwärtiger Klimaeinflussprozesse, sowie zur Abschätzung zukünftiger Klimaeinflüsse auf die Pflanzenphänologie.

Contents

Abstract	i
Zusammenfassung	i
Contents	v
List of Figures	ix
List of Tables	xi
1 Plant Phenology in a Changing Climate	1
1.1 Phenology – an Introduction	1
1.1.1 Historical development and definitions of phenology	3
1.1.2 Historical and recent phenological observations	8
1.1.3 Drivers of phenological variability	14
1.2 Climate change and its impact on phenology	15
1.2.1 Impact on phenology from global to regional scales	15
1.2.2 Simple and complex modeling	18
1.3 Project background and structure of the thesis	25
1.3.1 Project background	25
1.3.2 Structure of the thesis	26
References	27
2 Klimawandel und der Einfluss auf die Frühlingsphänologie	37
2.1 Das globale und regionale Klima im Wandel	39
2.2 Der Einfluss des Klimas auf phänologische Phasen	40
2.3 Schweizer Trends und regionale Variabilität 1965–2002	42

2.4	Entwicklung über Jahrzehnte und Jahrhunderte: Historische Phänologie	43
2.5	Kirschenblüte im Schweizer Mittelland seit 1721	45
2.6	Schlussfolgerungen	46
	References	47
3	Johann Jakob Sprüngli – europäischer Pionier der systematischen Pflanzenbeobachtung und Wegbereiter der Historischen Klimaforschung	51
4	A phenology-based reconstruction of inter-annual changes in past spring seasons	59
4.1	Introduction	60
4.2	Data and methods	63
4.2.1	Data sources	63
4.2.2	Reconstruction method	67
4.3	Results	69
4.4	Discussion	75
4.5	Conclusions and potential application	78
	References	79
5	Grape Harvest Dates as a proxy for Swiss April to August Temperature Reconstructions back to AD 1480	87
5.1	Introduction	88
5.2	Data	88
5.3	Methods	89
5.4	Results and Discussion	90
5.5	Conclusions	94
5.6	Auxiliary material	95
5.6.1	Extremely wet September months	95
5.6.2	List of volcanic eruptions	95
	References	96
6	Exceptional European warmth of autumn 2006 and winter 2007: Historical context, the underlying dynamics, and its phenological impacts	99
6.1	Introduction	100
6.2	Data and Methods	100
6.3	Results and Discussion	101

6.4	Conclusions	106
6.5	Acknowledgments	106
6.6	Auxiliary Material: The Welch t-test	107
	References	108
7	Swiss Spring Plant Phenology 2007: Extremes, a multi-century perspective and changes in temperature sensitivity	111
7.1	Introduction	112
7.2	Data and Methods	113
7.3	Results and Discussion	114
	7.3.1 Phenological extremes 2007	117
	7.3.2 Temperature sensitivity	117
7.4	Conclusions	119
	References	119
8	Time series modelling and temperature impact assessment of phenological records in the last 250 years	123
8.1	Introduction	124
	8.1.1 Long-term phenological observations	124
	8.1.2 Temperature reconstruction	125
	8.1.3 Linear trend analysis and Bayesian modelling	125
8.2	Material and Methods	127
	8.2.1 Material	127
	8.2.2 Methods	128
8.3	Results	131
8.4	Discussion	137
8.5	Conclusions	141
8.6	Outlook	142
	References	142
9	Summary and Conclusions	147
10	Outlook	151
A	Growing Degree Day Modeling	155
B	Contributing student papers	163

viii

Acknowledgements

165

Curriculum Vitae

167