

## Abstract

The earth's climate governs a number of processes within the biosphere, as for instance the seasonal timing of the plant and animal life cycles, which is described by the science of phenology. During the last years phenology has been able to contribute significantly to climate impact research. This project aims at a comprehensive analysis of the Austrian phenological observations with respect to the impact of the climate variability on plants and insects. Up to now only parts of the Austrian phenological data set have been analysed. The Austrian phenological data set has features, which make it unique. There is for instance a large number of phases (244, of which about 50 to 100 can be used for analysis, depending on the required data density), which have been observed continuously since 1951 in Austria including the Alps, where the station elevation ranges from 150 to 1400 m MSL. The Alps are specifically sensitive to climate variability.

In early spring the spatial pattern of entry dates hints at the start of the phenological phases in the southwest of the station network moving northeast, while later phases may also move from southeast to northwest. Summer phases have an above average spatial sensitivity. The idea of a general temperature sensitivity connected with each phase has been looked at and the thesis of the spatial gradient law of phenology formulated. This law says that the spatial gradient of a phenological phase is a combination of the spatial temperature gradient and the spatial sensitivity of the phase.

The multiple linear regression model (MLR – model), which calculates the phase entry dates as function of the station coordinates, is able to explain a great fraction of the spatial variability of the phenological entry dates, in some cases more than 70%. Temperature as well as phenological phases display alike residual patterns, which are not described by the MLR – model. Phenological stations form clusters of contiguous areas with similar residual values. Therefore it appears that not so much local microclimate governs the phenological residuals, but regional climatic deviations. This warrants a deeper investigation into the physical mechanisms behind the spatial residuals of the phenological entry dates.

With the help of a new graphical trend representation phenological time series could be transformed into an easily readable trend pattern, which enables a clear identification of trend periods. Most phases show a trend towards earlier entry dates from 1951 – 2005, whereby the entry dates of the last 5 to 10 years have remained at the same level. The trend towards earlier entry dates, which began at the end of the eighties, has not been continued. Highest trend values are linked with fruit ripening phases, medium trend values with spring phases (leaf unfolding and first flowering), while the autumn trends are ambiguous. The vegetation period does not show a clear trend either. Since 1979 a trend towards a prolongation of the vegetation period can be observed. The time between flowering and fruit ripening has dramatically shortened during the last decades, because the fruit ripening phases have been moving faster to earlier entry dates than the flowering phases. Fruit ripening phases appear to be more temperature sensitive than any other phases. Trend values are usually not changing with elevation, except a few fruit ripening phases, which show a stronger trend towards earlier entry dates with increasing elevation.

Based on the cockchafer observations collected by AGES throughout the country the shift of the flight intensity maxima from 4 to 3 year cycles was investigated as function of temperature. Unfortunately it was impossible to find any stations, which showed a jump from a 4 year to a 3 year reproduction cycle during the last 57 years. The data density of the last 20 years, where such a jump could be expected, was too low. The temperature separating the 3 year from the 4 year cycle is about 13.75°C. Comparing the maps of the cockchafer cycles from 1928 with that of 1961, one can easily recognise a shift of the 3 year cycle areas into the 4 year cycle areas. If there happens no change in the spatial distribution of the cockchafer for instance through prolonged summer drought, the probability is high that today's areas with 4 year reproduction cycle will completely be replaced by a 3 year cycle by 2100.

Increasing temperatures during the last decades clearly have lead to earlier phenological entry dates of a number of spring and summer phases in Europe and North America. It is feared that these observed temperature trends will continue in future. The possible impact of increasing temperatures on ecosystems should be known beforehand. The most popular methods to link local phenological entry dates with large scale fields of calculated future climate scenarios use a two step procedure. The first step links the large scale variability of the climate model with the local temperature and in a second step the local scale phenological variables are calculated with the downscaled local scale temperature as input. Based on the work of Maak and von Storch (1997), Matulla et al. (2003) developed a procedure, where the variability of the large scale fields is directly related with the local scale phenological variables. This work relies on large scale fields from the ECHAM5/OPYC3 climate

scenario experiments based on the emission scenarios SRES A1B and B1. The resulting expected shifts of the phenological entry dates comparing the time periods 1951-2005 and 2050-2100 can be classified into 3 groups, where the spring phases shift to earlier occurrence dates by 5 to 10 days, the ripening phases by up to 15 days and the shifts of the autumn phases appear ambiguous. The results indicate that the trends of the last 20 years might already be part of the modelled future trends of the next decades. Nevertheless the present entry dates seem to be too early if related with the developments indicated by the calculated climate scenarios. Only after a few decades today's entry dates are attained by the climate scenarios.

## Kurzfassung

Das Klima steuert zahlreiche Vorgänge in der Biosphäre, die von der Klimafolgenforschung untersucht werden. Ihr ist zu verdanken, dass die Phänologie während der letzten Jahre aus ihrem Schattendasein ins Rampenlicht gerückt wurde. Die Phänologie konnte viel zu dem Bild beitragen, das wir heute von der Wirkung der Klimavariabilität auf die Biosphäre besitzen. Dieses Projekt hat sich zum Ziel gesetzt, die österreichischen Phänologiedaten möglichst umfassend in Hinsicht auf die Problematik der Klimawirkung auszuwerten. In diesem Umfang ist das bisher nicht geschehen. Der phänologische Datensatz der ZAMG weist einige Merkmale auf, die einmalig sind, wie zum Beispiel die große Zahl von beobachteten Phasen (244, von denen etwa 50 bis 100, je nach Zeitabschnitt, zu verwerten sind), die kontinuierlich seit 1951 im alpinen Raum (mit Stationshöhen von 150 m bis über 1400 m MSL) beobachtet und gesammelt werden. Die Alpen gelten klimatisch als besonders sensibel.

Die räumlichen Muster Phaseneintrittszeiten deuten auf ein Fortschreiten des Phasenbeginns im frühen Frühjahr von Südwesten nach Nordosten, während spätere Phasen auch von Südosten nach Nordwesten durch das Beobachtungsgebiet durchziehen können. Die Sommerphasen weisen eine besonders hohe räumliche Empfindlichkeit auf. Ansatzweise wurde der Gedanke einer allgemeinen Temperaturempfindlichkeit, die jeder Phase zugeordnet ist, verfolgt und in der These eines räumlichen Gradientengesetzes der Phänologie postuliert. Grundlage des räumlichen Gradientengesetzes der Phänologie ist die Beobachtung, dass jeder phänologischen Phase eine eigene Temperaturempfindlichkeit zugeordnet werden kann. Das Gesetz besagt, dass der räumliche Gradient einer phänologischen Phase eine Kombination aus dem räumlichen Temperaturgradienten und der räumlichen Empfindlichkeit der Phase ist.

Das multiple lineare Regressionsmodell (MLR – Modell), das die Eintrittszeiten als Funktion der Stationskoordinaten modelliert, vermag die räumliche Variabilität der phänologischen Eintrittszeiten wenn auch zu einem hohen Grad (in vielen Fällen > 70%) aber doch nicht vollständig zu beschreiben. Sowohl die Temperatur als auch die phänologischen Phasen zeigen ein Residuenmuster, das durch das MLR – Modell nicht erfasst wird. Phänologische Stationen können Gebieten positiver und negativer Residuen zugeordnet werden. Daher werden Residuen weniger durch Besonderheiten des Mikroklimas an den Stationen verursacht, sondern vielmehr durch großräumige klimatische Besonderheiten.

Die Ergebnisse dieses Kapitels öffnen neue Aspekte phänologischer Forschung und rechtfertigen eine eingehendere Beschäftigung mit dem physikalischen Mechanismen, welche die räumliche Verteilung der phänologischen Eintrittszeiten und ihrer korrespondierenden Temperatursummen steuern.

Mit Hilfe einer neuen Art der grafische Aufbereitung der Trendwerte konnte ein leicht lesbares Trendmuster hergestellt werden, das es ermöglicht, Trendwertebereiche der phänologischen Zeitreihen zu unterscheiden. Bei sämtlichen Phasen deuten die Trends im Zeitraum von 1951 – 2005 auf frühere Eintrittszeitpunkte, wobei die Eintrittszeitpunkte der letzten 5 bis 10 Jahre ein gleichsam neues, etwas früheres, Niveau halten und sich der Trend der frühen 90iger Jahre zu früheren Eintrittszeitpunkten nicht fortgesetzt hat. Höchste Trendwerte sind mit Fruchtreifephassen verbunden, mittlere Trendwerte mit den Frühjahrsphasen (Blattentfaltung und Blüte) während die Trends der Herbstphasen wenig eindeutig sind. Die Vegetationsperiode zeigt kein eindeutiges Verhalten. Seit 1979 lässt sich wieder ein Trend zu einer längeren Vegetationsperiode beobachten. Der Zeitraum zwischen Blüte und Fruchtreife ist während der letzten Jahre deutlich geschrumpft, da die Fruchtreifephassen ihre Eintrittszeiten rascher nach vorne verschoben haben, als die Blühphasen. Die Fruchtreifephassen reagieren offenbar besonders empfindlich auf Temperaturschwankungen. Die Trendwerte nehmen nur bei einigen wenigen Phasen mit der Höhe signifikant zu, wobei es sich vornehmlich um Fruchtreifephassen handelt.

Auf Grundlage der Maikäferflugintensitätsbeobachtungen der AGES wurde die Verschiebung der Flugintensitätsmaxima von 4 zu 3 jährigen Zyklen oder umgekehrt als Funktion der Temperatur über die letzten 50 Jahre analysiert. Es war leider nicht möglich, Stationen zu finden, die einen Zyklusprung von einem 3 zu einem 4 jährigen Zyklus oder umgekehrt während des Beobachtungszeitraumes aufweisen. Die Datendichte der letzten 20 Jahre ist bei Anwendung der hier entwickelten numerischen Analysemethoden für diesen Zweck zu gering. Der Temperaturwert, der die 3 und 4 jährigen Vermehrungszyklen trennt, liegt bei 13.75°C. Vergleicht man die Maikäferzyklenkarte aus dem Jahr 1928 mit derjenigen aus dem Jahr 1961, so kann man sehr leicht die Verschiebung der Gebiete mit dem 3 jährigen Zyklus in die Gebiete mit dem 4 jährigen Zyklus von 1928 bis 1961 beobachten. Vergleicht man die eben erwähnten handgezeichneten Karten mit den numerischen Karten dieser Arbeit, so kann man feststellen, dass die Algorithmen recht gut in der Lage sind, die richtigen Zyklendauern und Phasen an den einzelnen Stationen und in den Gebieten zu identifizieren.

Falls sich keine Verschiebung des Verbreitungsgebietes der Maikäfer ergibt, beispielsweise durch vermehrte Sommertrockenheit, dann ist unter Voraussetzung der Ergebnisse aus den berechneten Klimaszenarien (SRES B1 und A1B) die Wahrscheinlichkeit sehr hoch, dass die Gebiete mit 4 jährigen Entwicklungszyklen bis zum Jahr 2100 verschwunden sein werden.

Die steigenden Temperaturen der letzten Jahrzehnte führten nachweislich zu einer Vorverschiebung der Eintrittsdaten vieler Frühlings- und Sommerphasen in Europa. Es wird befürchtet, dass sich die beobachteten Temperaturtrends in der Zukunft fortsetzen könnten. Die möglichen Wirkungen sich erhöhender Temperaturen auf Ökosysteme sollte möglichst im Vorhinein abgeschätzt werden. Die gängigsten statistischen Methoden, um phänologische Eintrittsdaten mit berechneten künftigen Klimaszenarien in Verbindung zu bringen, arbeiten in einem Zweischrittverfahren, wobei in einem ersten Schritt die großskalige Variabilität der Klimamodelle mit lokalskaligen Temperaturparametern verknüpft wird und in einem zweiten Schritt die lokalskalige Temperatur als Input für Phänologiemodelle verwendet wird, um Eintrittsdaten der phänologischen Phasen zu berechnen. Im Gegensatz dazu wurde von Matulla et al. (2003) auf Grundlage der Arbeit von Maak and von Storch (1997) ein Verfahren entwickelt, das die Variabilität der großskaligen Felder direkt mit der Variabilität der lokalskaligen phänologischen Phasen verbindet. Für diese Arbeit wurden großskalige Felder der beiden Klimaszenarien A1B und B1, berechnet mit dem Modellsystem ECHAM5/OPYC3, verwendet. Die mögliche künftige Verschiebung der Eintrittszeiten (Differenz zwischen 1951-2005 – 2005-2100) zerfällt in 3 Kategorien, wobei die Frühjahrsphasen um 5 bis 10 Tage, die sommerlichen Reifephasen um bis zu 15 Tage früher auftreten und die Herbstphasen ein unklares Verhalten zeigen. Aus den Ergebnissen lässt sich ableiten, dass die während der letzten 20 Jahre beobachteten Trendwerte bereits eine Eigenschaft darstellen, die sich in den Klimaszenarien während der nächsten Jahrzehnte fortsetzen wird. Dennoch sind die zur Zeit beobachteten Eintrittsdaten in Relation zu den berechneten Klimaszenarien zu früh und sollten erst in Jahrzehnten das heutige Niveau erreicht haben.