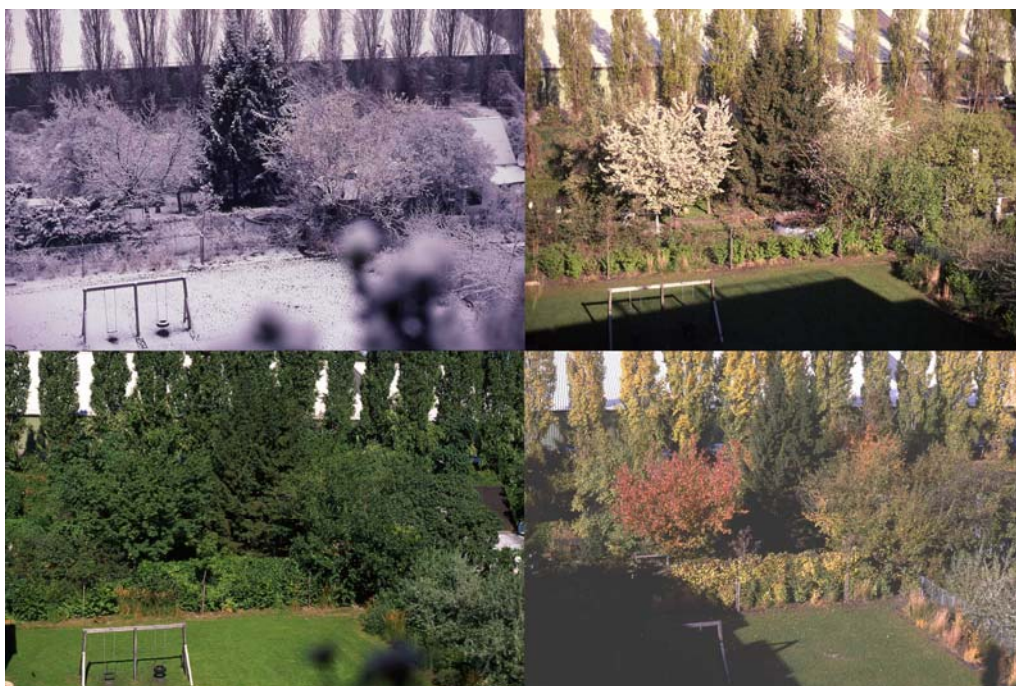




## CLIMPHEN

# „Climate impact on plant and insect phenology in Austria“



Helfried Scheifinger (1), Christoph Matulla (3), Peter Cate (2), Andreas Kahrer(2) und Elisabeth Koch (1)

(1) Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Hohe Warte 38, A – 1190 Wien, Austria,

(email: [Helfried.Scheifinger@zamg.ac.at](mailto:Helfried.Scheifinger@zamg.ac.at) / Tel.: +43 1 36026 2410 / Fax.: +43 1 36026 74)

(2) AGES, Institut für Pflanzengesundheit, Spargelfeldstr. 191, A – 1220, Wien, Austria

(3) Climate Research Branch (CCRM), Meteorological Service of Canada, 4905 Dufferin Street, Downsview, Toronto, Ontario, M3H 5T4, Canada

**Gefördert vom ‚Global Change Programme‘ der  
Österreichischen Akademie der Wissenschaften**



**Wien, Juni 2007**

## Inhalt

ABSTRACT .....	4
KURZFASSUNG.....	6
<b>1. EINLEITUNG .....</b>	<b>8</b>
<b>2. DATENQUALITÄTSKONTROLLE.....</b>	<b>9</b>
AUFBEREITUNG DER MAIKÄFERBEOBACHTUNGEN .....	9
<b>3. ZIEL 1: RÄUMLICHE ANALYSE.....</b>	<b>10</b>
3.1. EINLEITUNG .....	10
3.2. BERECHNUNG EINER PHÄNOLOGISCHEN KORRESPONDENZTEMPERATUR $T_p$ .....	10
3.3. RÄUMLICHE MODELLIERUNG DER PHÄNOLOGISCHEN PHASEN UND DER TEMPERATUR $T_p$ .....	10
3.4. DIE RÄUMLICHEN GRADIENTEN DER EINTRITTSDATEN DER PHÄNOLOGISCHEN PHASEN UND IHRER TEMPERATUR $T_p$ .....	11
3.5. ZUR TEMPERATUREMPFINDLICHKEIT PHÄNOLOGISCHER PHASEN.....	12
3.6. DIE RÄUMLICHE EMPFINDLICHKEIT UND RÄUMLICHE TEMPERATUREMPFINDLICHKEIT VON PHÄNOLOGISCHEN PHASEN .....	13
3.7. ZUSAMMENFASSUNG .....	13
<i>Weitere Untersuchungen</i> .....	14
<b>4. ZIEL 1: KOMPLEXE TOPOGRAPHIE UND PHÄNOLOGISCHE EINTRITTSZEITEN .....</b>	<b>14</b>
4.1. RESIDUEN DER ECSN TEMPERATUREN.....	15
<i>Weitere Untersuchungen</i> .....	15
4.2. RESIDUEN DER PHÄNOLOGISCHEN EINTRITTSZEITEN .....	15
4.3. RESIDUEN UND INTERPOLATION .....	16
<i>Weitere Untersuchungen</i> .....	16
4.4. ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN .....	16
<b>5. ZIEL 2: KOMBINIERTE RÄUMLICHE UND ZEITLICHE ANALYSE .....</b>	<b>17</b>
5.1. ERGEBNISSE.....	17
<i>Weitere Untersuchungen</i> .....	18
<b>6. ZIEL 2: KOMBINIERTE RÄUMLICHE UND ZEITLICHE ANALYSE .....</b>	<b>19</b>
6.1. EINLEITUNG .....	19
6.2. ERGEBNISSE.....	19
<b>7. ZIEL 3: PHÄNOLOGIE UND KÜNFTIGE KLIMASZENARIEN.....</b>	<b>23</b>
7.1. EINLEITUNG .....	23
7.2. DATENSÄTZE .....	23
7.3. ERGEBNISSE.....	23
<i>Weitere Untersuchungen</i> .....	24
<b>8. ZIEL 4. KOMBINIERTE ENTOMOLOGISCHE UND KLIMATOLOGISCHE EVALUIERUNG DER ERGEBNISSE.....</b>	<b>25</b>
<b>9. ZIEL 4. KOMBINIERTE ENTOMOLOGISCHE UND KLIMATOLOGISCHE EVALUIERUNG DER ERGEBNISSE.....</b>	<b>25</b>
<b>10. LITERATUR.....</b>	<b>26</b>

**Danksagung**

Das Projektteam bedankt sich bei der Österreichischen Akademie der Wissenschaften und dem Bundesministerium für Forst- und Landwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft für das Interesse und die Finanzierung dieser Arbeit.

## 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 Fruchtreifephase 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 Fruchtreifephase ihre Eintrittszeiten rascher nach vorne verschoben haben, als die Blühphasen. Die Fruchtreifephase reagieren offenbar besonders empfindlich auf Temperaturschwankungen. Die Trendwerte nehmen nur bei einigen wenigen Phasen mit der Höhe signifikant zu, wobei es sich vornehmlich um Fruchtreifephase 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.

## 1. Einleitung

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.

Während der letzten 100 Jahre ist die globale Mitteltemperatur um etwa 0.6 bis 0.9°C angestiegen (IPCC, Fourth Assessment Report 2007, [http://www.wmo.int/pages/partners/ipcc/index\\_en.html](http://www.wmo.int/pages/partners/ipcc/index_en.html)). Eine immer größer werdende Zahl von Arbeiten berichtet, dass Pflanzen und Tiere der mittleren und höheren Breiten der nördlichen Hemisphäre bereits auf diesen Temperaturanstieg reagieren (Walther et al., 2002; Root et al., 2003; Parmesan and Yohe, 2003; Menzel et al., 2006). Lange phänologische Beobachtungsreihen zeigen, dass Blühphasen und Laubentfaltungsphasen in Europa und Nordamerika sich während der letzten 50 Jahre etwa um 1.2 bis 3.8 Tage/Jahrzehnt nach vorne, die Herbstphasen sich um 0.3 bis 1.6 Tage/Jahrzehnt nach hinten verschoben haben, so dass sich die Vegetationsperiode insgesamt um 1.5 bis 5.2 Tage/Jahrzehnt verlängert hat (Menzel, 2002). In Westeuropa wurde außerdem bei Schmetterlingen eine Verschiebung des ersten Auftretens im Frühjahr und des maximalen Auftretens zu früheren Zeitpunkten beobachtet. Die Vogelzug- und Vogelbrutzeiten zeigen in Europa und Nordamerika ebenfalls Reaktionen auf die Temperaturvariabilität (Sparks and Menzel, 2002).

Zwei Argumente sprechen für eine genauere Untersuchung der in Österreich verfügbaren phänologischen Zeitreihen.

- Im Gegensatz zum Anstieg der globalen Mitteltemperatur um 0.6 bis 0.9°C während der letzten 100 Jahre stieg die Temperatur im Alpenraum mit etwa 1.5 bis 1.8°C im selben Zeitraum um mehr als das doppelte an (Fourth Assessment Report, 2007; Böhm et al., 2001).
- Das Beobachtungsgebiet der Phänologie in Österreich schließt einen großen Teil des Ostalpenraumes mit ein. Seit 1951 werden hier phänologische Beobachtungen systematisch gesammelt und archiviert. Diese Zeitreihen sind zu einem größeren Teil bereits digitalisiert und stehen damit für wissenschaftliche Untersuchungen zur Verfügung.

Dieses Projekt hat sich zum Ziel gesetzt, die österreichischen Phänologiedaten möglichst umfassend in Hinblick 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 (Abb. 1 bis 4). Die Wirkung zweier möglicher zukünftiger Klimaszenarien auf die phänologischen Eintrittstermine werden in dieser Arbeit ebenfalls besprochen.

Die Ansprüche im Projektantrag waren mit dem Begriff ‚umfassend‘ in Relation zum vorgegebenen Rahmen recht hoch gegriffen. Umfassend ist daher weniger im Sinne einer erschöpfenden, tiefgreifenden Analyse zu verstehen, sondern vielmehr im Sinne einer Bearbeitung zahlreicher Aspekte der phänologischen Grundlagenforschung. Dabei konnten manche Fragen beantwortet werden, oft mit unerwarteten Ergebnissen, aber noch viel mehr Fragen wurden aufgeworfen, die einer weiteren Bearbeitung bedürfen. Die Fragen wurden systematisch gesammelt und sind in den entsprechenden Unterkapiteln angeführt. Die Phänologie ist auf Grundlage der vorliegenden Daten durchaus ausbaufähig. In Kooperation mit einschlägigen Instituten, die sich mit Pflanzenphysiologie, Entomologie oder Ornithologie beschäftigen, werden weitere vertiefende Studien vorgeschlagen. Österreich besitzt hier durchaus das Potential, um auf einem höchst aktuellen Forschungsgebiet an vorderster Front mitzuwirken.

Mit wenigen und begründbaren Abweichungen konnte der im Projektantrag vorgestellte Arbeitsplan erfüllt und die versprochenen ‚deliverables‘ hergestellt werden.



## 2. Datenqualitätskontrolle

Alle empirischen Datensätze haben eine Eigenschaft gemeinsam: sie sind fehlerhaft. Ein Reihe von Fehlerquellen verursacht in allen Stadien der Beobachtung, Messung, Datensammlung, Digitalisierung und Abspeicherung Abweichungen von der ‚Wirklichkeit‘. Das Ziel der Datenqualitätskontrolle ist die Beseitigung von Fehlern des Rohdatensatzes, um diesen möglichst an die ‚Wahrheit‘ heranzuführen. Im Falle von phänologischen Daten gibt es keine Methode, die allen Ansprüchen genügt. Je nach Situation müssen verschiedene Verfahren zur Qualitätskontrolle angewendet werden.

Falls die Kapazitäten vorhanden sind, können die Eintragungen im phänologischen Beobachtungsblatt mit den digitalisierten Daten verglichen werden. Bei einer derartigen großangelegten Überprüfung an der ZAMG im Rahmen des EU – Projektes ‚POSITIVE‘ (Phenological Observations and Satellite Data (NDVI): Trends in the Vegetation Cycle in Europe) konnten 23 unterschiedliche Fehlerquellen identifiziert werden, die sowohl mit Fehleintragungen des Beobachters zu tun hatten als auch mit Problemen bei der Digitalisierung. Viele dieser Fehlermöglichkeiten können mit automatisierten Verfahren erkannt werden.

Eine weitere Möglichkeit der Qualitätskontrolle basiert auf dem Ausschluss unwahrscheinlicher Eintrittsdaten, beispielsweise über Modelle, um Residuen von phänologischen Beobachtungen zu berechnen. Überschreiten die Residuen eine gewisse willkürlich festgelegte oder auf statistischen Kriterien beruhende Grenze, wird die Beobachtung auf Ausfall gesetzt. In einem anderen Fall hat es sich als günstig erwiesen, ganze Beobachtungszeitreihen an Stationen miteinander zu korrelieren, um zwischen wahrscheinlich ‚guten‘ und ‚schlechten‘ Zeitreihen zu unterscheiden. Bei allen mathematischen Verfahren besteht immer das Risiko, durchaus korrekte Beobachtungen auszuschließen.

Für dieses Projekt wurden Beobachtungen mittels eines multiplen Regressionsmodells geprüft:

$$R_i = (a_1 + a_2 \lambda_i + a_3 \varphi_i + a_4 z_i) - Y_i, \quad (1)$$

mit den Stationen  $i=1, \dots, n$ , der geografischen Länge  $\lambda_i$ , der geografischen Breite  $\varphi_i$  und der Höhe  $z_i$ . Die Überprüfung erfolgt jahresweise.  $Y_i$  stellt das Eintrittsdatum der phänologischen Phase dar, und  $a_1, a_2, a_3$  and  $a_4$  die Regressionskoeffizienten. Eintrittszeiten, die in die unteren und oberen 0.5% der Verteilung der Residuen fielen, wurden auf Ausfall gesetzt. Eine qualitative Überprüfung dieses Verfahrens ergab, dass die meisten offensichtlichen Ausreißer so zu verschwinden gebracht werden konnten.

Um die statistische Regionalisierung und andere Untersuchungen durchzuführen, wurde ein phänologischer Datensatz mit vollständigen Zeitreihen vorbereitet. Falls an einer Station mehr als 20 Beobachtungen einer phänologischen Phase im Zeitraum von 1951 – 2005 vorlagen, wurden die restlichen Jahre mittels höhenreduzierter IDW (Inverser Distanzgewichtung) aus benachbarten Stationen interpoliert (Abb. 4).

### Aufbereitung der Maikäferbeobachtungen

Die Maikäferbeobachtungen konnten für die Jahre 2004 und 2005 ergänzt werden, sodass für das Projekt von insgesamt 3902 Schulen Beobachtungen in digitalisierter Form von 1949 bis 2005 zur Verfügung standen. Obwohl in diesem Zeitraum 25% der Volksschulen, an denen die Maikäferbeobachtungen durchgeführt wurden, geschlossen wurden, sind die Koordinaten und Höhen aller Schulen erhoben worden.

### 3. Ziel 1: Räumliche Analyse

Auf Grundlage der langjährigen mittleren Eintrittsdaten der Pflanzen- und Insektenphasen sind die räumlichen Eintrittsgeschwindigkeiten über dem Untersuchungsgebiet in Nord-Süd und Ost-West Richtung und entlang der Höhenstufen zu untersuchen. Eine Verbindung zur Erwärmung des europäischen Kontinents im Frühjahr ist herzustellen.

#### 3.1. Einleitung

Österreichs besondere geografische Lage und das phänologische Datenmaterial, das seit 1951 gesammelt und zu einem guten Teil digitalisiert wurde, rechtfertigt eine genauere Untersuchung, wie die phänologischen Phasen auf atmosphärische Umwelteinflüsse reagieren. Österreich liegt im Einflussbereich des Atlantik im Westen und des Euroasiatischen Kontinentes im Osten. Im Süden macht sich der klimatische Einfluss des Mittelmeerraums bemerkbar. Die Alpen bestimmen großteils die Topographie Österreichs. Das Stationsnetz spannt 7 Längengrade und 2.5 Breitengrade und ein Höhenintervall von 150 bis 1400 m (Abb. 1, 2 und 3).

#### 3.2. Berechnung einer phänologischen Korrespondenztemperatur $T_p$

Die Temperatur ist der wichtigste atmosphärische Faktor, der die räumliche und zeitliche Variabilität der phänologischen Phasen in mittleren und höheren Breiten steuert. Um eine Temperatur zu erhalten, die einen speziellen Bezug zu jeder Phase aufweist, wurden die HISTALP (HISTORICAL INSTRUMENTAL CLIMATOLOGICAL SURFACE TIME SERIES OF THE GREATER ALPINE REGION 1760-2003, Auer et al., 2006) Temperaturzeitreihen mit Hilfe der höhenreduzierten IDW für jeden einzelnen Monat an jeder phänologischen Station interpoliert. In einem weiteren Arbeitsschritt wurde dann für jede phänologische Phase ein MLR (Multiples Lineares Regressions) – Modell folgendermaßen konstruiert: Für das MLR Modell wurden  $m$  Monate ausgewählt, wobei  $m$  den Monat des mittleren langjährigen Eintrittsdatums,  $c_1, \dots, c_{m+1}$  die Koeffizienten des MLR Modells,  $p$  die mittlere phänologische Zeitreihe über alle Stationen und  $T$  die mittlere Temperaturzeitreihe über alle Stationen darstellen:

$$p = c_1 + c_2 T_1 + c_3 T_2 + \dots + c_{m+1} T_m \quad (2)$$

Die Zeitreihe der phänologischen Korrespondenztemperatur  $T_p$  wurde für jede Phase und Station mit Hilfe der normalisierten und vorzeicheninvertierten MLR Koeffizienten so berechnet:

$$T_p = \frac{(-1)c_2 T_1 + (-1)c_3 T_2 + \dots + (-1)c_{m+1} T_m}{|c_2| + |c_3| + \dots + |c_{m+1}|} \quad (3)$$

wobei  $T_p$  die Zeitreihe der jährlichen Temperaturwerte repräsentativ für die Phänophase  $p$  an jeder Station  $s$  und  $T_m$  die an jeder Station interpolierte monatliche Temperaturzeitreihe darstellen. Abb. 5 zeigt, dass die durch die Temperaturzeitreihen erklärte Varianz der phänologischen Phasen im allgemeinen relative hoch ist. Allerdings sind, wie zu erwarten, die Eintrittszeiten der Herbstphasen nicht leicht mit der Temperatur in Beziehung zu setzen.

#### 3.3. Räumliche Modellierung der phänologischen Phasen und der Temperatur $T_p$

Eine der grundlegenden Fragen betrifft den Einfluss der räumlichen Verteilung der österreichischen phänologischen Stationen auf die phänologischen Eintrittszeiten. Das folgende MLR Modell beleuchtet die Beziehung zwischen den phänologischen Eintrittszeiten und den Stationskoordinaten:

$$p = c_1 + c_2 \lambda + c_3 \phi + c_4 z, \quad (4)$$

Wobei  $p$  das langjährige mittlere Eintrittsdatum der phänologischen Phase,  $c_1, \dots, c_4$  die MLR Koeffizienten und  $\lambda$ ,  $\phi$  und  $z$  die Stationslänge, -breite und -höhe darstellen. Das analoge Modell wurde für die Temperatur  $T_p$  konstruiert.

Die räumliche Varianz der langjährigen mittleren Temperatur  $T_p$  erklärt durch die Stationskoordinaten beträgt bei manchen Phasen über 90%, während die räumliche Modellierung der langjährigen

mittleren phänologischen Eintrittsdaten deutlich schlechter ausfällt (Abb. 6). Die räumliche erklärte Varianz der phänologischen Phasen durchläuft einen Jahresgang, wobei die niedrigsten Werte mit den frühen Phasen und den Herbstphasen verbunden sind.

### 3.4. Die räumlichen Gradienten der Eintrittsdaten der phänologischen Phasen und ihrer Temperatur $T_p$

Um einen über Österreich hinausgehenden größeren geografischen Rahmen abzustecken, in dem sich die räumlichen Gradienten der phänologischen Phasen bewegen, werden die räumlichen Gradienten der langjährigen mittleren Temperaturen von 4 Datensätzen untersucht (Abb. 7). Für jede der 3 Raumachsen und jedes Monat wird das räumliche MLR Modell angewendet (Gleichung 4) und die Modellkoeffizienten werden für folgende 4 Fälle (berechnet über den Zeitraum 1951 – 2005) dargestellt: für alle HISTALP Stationen in und um Österreich, für alle HISTALP Stationen, für Europa (der CRU 5°x5° Datensatz <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/>) und für die Korrespondenztemperatur  $T_p$ .

Die meridionalen Gradienten sind für alle räumlichen Größenordnung ähnlich (Abb. 7 links). Der Kontinent ist während der kalten Jahreszeit im Westen deutlich wärmer als im Osten. Nur während der warmen Jahreszeit wird für kurze Zeit das Innere des Euroasiatischen Kontinentes wärmer, als die dem Ozean zugewandten Ränder. Die Temperaturgradienten der Korrespondenztemperatur  $T_p$  an den phänologischen Stationen weichen von diesem Muster ab, da es keine phänologischen Phasen gibt, die ausschließlich von den Sommertemperaturen gesteuert werden.

Der zonalen Temperaturgradienten hängen von der räumlichen Ausdehnung des betrachteten Gebietes ab, wiewohl sie insgesamt negativ sind, da sie, wie zu erwarten, die Temperaturabnahme nach Norden hin andeuten (Abb. 7, Mitte). Die jahreszeitlichen Schwankungen der zonalen Temperaturgradienten zwischen den österreichischen HISTALP Stationen und allen HISTALP Stationen sind einander entgegengesetzt. In einer ersten spekulativen Erklärung kann man davon ausgehen, dass die geringen winterlichen meridionalen Temperaturgradienten der österreichischen HISTALP Stationen (schwarz in Abb. 7 Mitte) mit den alpinen Becken südlich des Alpenhauptkammes in Zusammenhang stehen, die während des Winters mit Kaltluftseen gefüllt sind. Auf der anderen Seite könnten die relative milden Ozeanoberflächentemperaturen des Mittelmeeres während des Winters den Temperaturgradienten zum kalten Kontinent im Norden verstärken (rot in Abb. 7 Mitte).

Im Fall der größten räumlichen Ausdehnung des Stationsnetzes auf Grundlage der CRU Temperaturdaten wird der meridionale Temperaturgradient recht niedrig (blau in Abb. 7 Mitte). Die Temperaturgradienten von  $T_p$  sind ähnliche denen der österreichischen HISTALP Stationen, aber zu geringeren Werten hin verschoben.

Die vertikalen Temperaturgradienten zeigen ein Maximum während der warmen Jahreszeit mit der besten vertikalen Durchmischung (Abb. 7 rechts).

Die Abweichungen der Temperaturgradienten der Korrespondenztemperatur  $T_p$  von den mittleren monatlichen Gradienten der anderen Temperaturdatensätze können recht groß sein, besonders in meridionaler Richtung und in der Höhe. Das könnte etwas mit Art zu tun haben, wie die Temperaturwerte aus den einzelnen Monaten gewichtet und zu einem Temperaturwert zusammengefasst werden.

Insgesamt passen die jahreszeitlichen räumlichen Temperaturverteilungen innerhalb des phänologischen Beobachtungsnetzes sehr gut zu denjenigen des europäischen Kontinentes, wenn man die regionalen Besonderheiten berücksichtigt, wie die winterlichen Kaltluftseen in den Beckenlagen und den Einfluss des Mittelmeeres im Winter.

Jetzt ist es von großem Interesse, zu sehen, wie die Phasen und ihre korrespondierenden Temperaturen  $T_p$  sich durch den Raum bewegen, der durch das phänologischen Stationsnetz aufgespannt wird und ob und in welcher Weise  $T_p$  in der Lage ist, diese Bewegung der Eintrittsdaten durch den Raum zu erklären.

In Abb. 8 sind die räumlichen Gradienten der mittleren langjährigen phänologischen Eintrittsdaten und ihrer korrespondierenden Temperaturen als Funktion der mittleren langjährigen phänologischen Eintrittsdaten dargestellt. Die dargestellten phänologischen Gradienten sind identisch mit den Koeffizienten des MLR Modells  $c_2$  (Tage/Längengrad),  $c_3$  (Tage/Breitengrad) und  $c_4$  (Tage/m). Je höher die Werte der Koeffizienten, um so langsamer bewegen sich die Eintrittsdaten durch den Raum. Die Abb. 8 besitzt eine Schlüsselstellung in diesem Kapitel. Das hervorstechendste Merkmal ist die

große Streuung der räumlichen Gradienten von Phase zu Phase. Das eingezeichnete Polynom deutet die jahreszeitliche Schwankung der räumlichen Gradienten nur an. Frühe Phasen beginnen eher im Westen und etwas später kommen dann Phasen hinzu, die aber zuerst im Osten mit Werten  $< 0$  beginnen (Abb. 8 links).

Deutlich klarer sind die meridionalen und vertikalen Gradienten geordnet (Abb. 8 Mitte und rechts). Bis auf einige wenige Herbstphasen deuten sämtliche Gradienten auf einen Beginn der Phasen im Süden und in tiefen Lagen. Sommerliche Reifephasen ragen als besonders breitengrad- und höhenempfindlich heraus.

Die Temperatur  $T_p$  zeigt eine jahreszeitliche Schwankung, die derjenigen der Phasen entspricht, allerdings mit einer deutlich verringerten Streuung (rot in Abb. 8). Bis zu einem gewissen Grad kann daher die Temperatur die jahreszeitliche Schwankung der phänologischen Gradienten erklären, aber nicht die Streuung. Die Unterschiede zwischen den räumlichen Gradienten der Temperatur  $T_p$  (grün) und den monatlichen Gradienten der anderen Temperaturdatensätze in Abb. 7 (schwarz, rot und blau) scheinen die Streuung der räumlichen Gradienten (Breitengrad und Höhe) der phänologischen Phasen (rot in Abb. 8) in einem gewissen Ausmaß zu erklären.

Vergleicht man die Gradienten der Temperatur  $T_p$  und diejenigen der phänologischen Phasen in den Streuplots, so stellt sich heraus, dass zwischen ihnen keine Korrelation herrscht (rot und schwarz in Abb. 8). Damit ergibt sich hier eine höchst interessante Frage: ist die Streuung der Gradienten der phänologischen Phasen eine Zufallserscheinung, die etwas mit den subjektiven phänologischen Beobachtungen zu tun haben, oder steckt hier ein System dahinter?

### 3.5. Zur Temperaturempfindlichkeit phänologischer Phasen

Die gemeinsame räumliche Varianz zwischen den langjährigen mittleren Eintrittsdaten und den korrespondierenden Temperaturen  $T_p$  beträgt für die meisten Phasen mehr als 60% (Abb. 9). Nur die Herbstphasen lassen sich im Raum mit der Temperatur schwer modellieren. Die entsprechenden räumlichen Temperaturempfindlichkeiten (Tage/°C) für jede Phase zeigen einen Jahresgang, wobei die Sommerphasen die höchsten Temperaturempfindlichkeiten aufweisen und die Herbstphasen die geringsten (Abb. 10 links).

Neben der räumlichen Temperaturempfindlichkeit der langjährigen mittleren Eintrittsdaten (als Funktion der langjährigen mittleren Temperatur  $T_p$  an jeder Station) gibt es auch noch die zeitliche Temperaturempfindlichkeit aus den phänologischen Zeitreihen und den Zeitreihen der Temperatur  $T_p$ , gemittelt über alle Stationen (Abb. 10 Mitte).

Die räumliche Temperaturempfindlichkeit ist ein Maß dafür, wie sich langjährige mittlere Eintrittsdaten eines Stationsnetzes mit der räumlichen Temperaturänderung innerhalb des Stationsnetzes ändern (Tage/°C). Die zeitliche Temperaturempfindlichkeit ist ein Maß dafür, in welchem Ausmaß sich eine zeitliche Änderung der Temperatur auf die Eintrittszeiten auswirkt.

Vergleicht man die räumliche und zeitliche Temperaturempfindlichkeit phänologischer Phasen als Funktion des langjährigen mittleren Eintrittsdatums einer Phase, so kann man eine ähnliche jahreszeitliche Verteilung feststellen, die sich in 3 Zeitabschnitte unterteilen lässt. Frühe Phasen weisen eine mittlere Temperaturempfindlichkeit auf. Von den frühen zu den späten Frühlingsphasen steigt die Temperaturempfindlichkeit und erreicht zu Beginn des Sommers die höchsten Werte. Die Herbstphasen zeigen eine recht geringe Temperaturempfindlichkeit (Abb. 10 links).

Die räumliche und zeitliche Temperaturempfindlichkeit sind mit einander schwach korreliert. Der Streuplot zeigt eine gemeinsame Varianz von 24% (Abb. 10 rechts). Der Bereich der zeitlichen Temperaturempfindlichkeit ist im Vergleich zu dem der räumlichen Temperaturempfindlichkeit stärker eingeschränkt. Wenn eine Phase in einem Fall (räumlich oder zeitlich) hochempfindlich ist, ist sie das wahrscheinlich auch im anderen Fall (räumlich oder zeitlich).

Die Phasen mit der höchsten räumlichen Temperaturempfindlichkeit sind die sommerlichen Fruchtreifephasen und die Phasen mit der geringsten Temperaturempfindlichkeit sind die Herbstphasen. Die Unempfindlichkeit der Herbstphasen gegenüber der Temperatur kann mit dem Einfluss der hohen Häufigkeit von herbstlichen Temperaturinversionen in Tal- und Beckenlagen in Verbindung gebracht werden, und einer allgemeinen Unempfindlichkeit gegenüber Temperaturänderungen der herbstlichen Laubverfärbungs- und Blattfallphasen. Es ist auch zu beobachten, dass die räumliche Temperaturempfindlichkeit im Herbst deutlich rascher zurückgeht, als die zeitliche Temperaturempfindlichkeit. Die herbstlichen Temperaturinversionen erzeugen eine räumlich heterogene Temperaturverteilung, die eine etwaige Temperaturbeeinflussung der

Herbstphasen verwischen kann. Hingegen ist die Variabilität der Herbsttemperaturen von Jahr zu Jahr nicht wesentlich anders als die der anderen Monate des Jahres. Die zeitliche Temperaturvariabilität ändert sich nicht wesentlich vom Sommer zum Herbst, die räumliche Temperaturvariabilität ändert sich aber sehr wohl vom Sommer zu Herbst.

Die hohe Temperaturempfindlichkeit einiger sommerlicher Fruchtreifephassen könnte etwas mit der Länge der Zeitspanne zu tun haben, über die die Temperatursummen zustandekommen und diese wiederum mit der topographischen Position der Station. Die Minimum- und Maximumtemperaturen, die Tagestemperaturamplitude und die Art und Weise, wie die Temperaturen über die vergleichsweise lange Reifeperiode akkumulieren, könnten auch bedeutsam sein.

### 3.6. Die räumliche Empfindlichkeit und räumliche Temperaturempfindlichkeit von phänologischen Phasen

Der Schlüssel zum Verständnis der Unterschiede zwischen dem räumlichen Gradienten der Phasen und derjenigen der Temperatur  $T_p$  in Abb. 8 ist die Beziehung zwischen der räumlichen Empfindlichkeit als Funktion der Stationskoordinaten und der räumlichen Empfindlichkeit als Funktion der Temperatur. Beide Empfindlichkeiten stehen in Beziehung zueinander (Abb. 11). Die Beziehung mit der Stationshöhe ist recht ausgeprägt (RSQ = 0.94), mit der Breitengrad der Station mäßig (RSQ = 0.39) und mit dem Längengrad der Station nicht existent. Abb. 11 verbindet die räumliche Empfindlichkeit der Phasen mit der räumlichen Temperaturempfindlichkeit. Zeigt beispielsweise eine Phase eine hohe räumliche Empfindlichkeit mit der Stationshöhe, so wird sie auch eine hohe Temperaturempfindlichkeit aufweisen. Ebenso ist die hohe räumliche Empfindlichkeit der sommerlichen Reifephassen mit ihrer gleichfalls hohen Temperaturempfindlichkeit verbunden (Abb. 8 und Abb. 11).

### 3.7. Zusammenfassung

Die oben geführte Diskussion lässt sich durch folgende Formeln zusammenfassen:

$$\frac{dT_p}{d\lambda} * \left( \frac{dp}{dT_p} \right)_{space} = \frac{dp}{d\lambda} \quad (5)$$

$$\frac{dT_p}{d\phi} * \left( \frac{dp}{dT_p} \right)_{space} = \frac{dp}{d\phi} \quad (6)$$

$$\frac{dT_p}{dz} * \left( \frac{dp}{dT_p} \right)_{space} = \frac{dp}{dz} \quad (7)$$

wobei  $T_p$  die langjährige mittlere Temperatur ist, die für jede Phase speziell aus mittleren monatlichen Temperaturen modelliert wurde (3),  $\lambda$ ,  $\phi$  und  $z$  sind Längen- und Breitengrad und Höhe der Station,  $p$  ist das mittlere langjährige Eintrittsdatum der phänologischen Phase. Die Dimensionen des obigen Ausdrucks sind auf beiden Seiten der Gleichung dieselben:

$$\left[ \frac{^{\circ}C}{deg} \right] * \left[ \frac{days}{^{\circ}C} \right]_{space} = \left[ \frac{days}{deg} \right] \quad (8)$$

Falls die Stationskoordinaten in ein kartesisches Koordinatensystem übergeführt werden, kann man 5 - 7 mit einem einzigen Ausdruck zusammenfassen:

$$\nabla T_p * \left( \frac{dp}{dT_p} \right)_{space} = \nabla p \quad (9)$$

Es ist in der Tat möglich, die räumliche Empfindlichkeit phänologischer Phase mit Hilfe von 5 - 7 über die räumliche Beziehung zumindest für die Stationshöhe und in einem gewissen Ausmaß für die Stationsbreite zu berechnen (analog für  $\phi$  und  $z$ ):

$$\left( \frac{dp}{dT_p} \right)_{space} = \left( \frac{dp/d\lambda}{dT_p/d\lambda} \right) \quad (10)$$

Die Werte für den räumlichen Temperaturgradienten der phänologischen Phasen auf der linken Seite der Gleichung kann jetzt mit dem Ausdruck auf der rechten Seite berechnet und mit dem aus der linearen Regression der langjährigen mittleren Eintrittszeiten als Funktion der dazugehörigen langjährigen mittleren Temperaturen  $T_p$  verglichen werden (Abb. 12). Dadurch kann die große Streuung der Abb. 8 erklärt und modelliert werden.

Die Grundlage des räumlichen Gradientengesetzes der Phänologie (5-7, 9), das an dieser Stelle als noch zu verifizierende These eingeführt werden soll, 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 der Temperatur  $T_p$  und der räumlichen Empfindlichkeit der Phase ist.

Die räumliche Struktur des Temperaturfeldes kann mit Hilfe der räumliche Temperaturempfindlichkeit der Phasen als Skalierungsfaktor die räumliche Struktur des Feldes der langjährigen mittleren Eintrittsdaten abbilden.

### Weitere Untersuchungen

Mit dem TAWES – Netz der ZAMG stehen etwa 150 Stationen mit stündlichen Temperaturwerten für eine Untersuchung zur Verfügung, um die Ursachen der recht unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Temperaturempfindlichkeiten phänologischer Phasen zu untersuchen.

Die hier geäußerten Spekulationen zur Erklärung der Unterschiede zwischen der räumlichen und zeitlichen Temperaturempfindlichkeit sind zu quantifizieren.

Das Konzept einer allgemeinen Temperaturempfindlichkeit phänologischer Phasen ist von zentraler Bedeutung für die Phänologie und Pflanzenphysiologie. Die räumliche und zeitliche Steuerung der Eintrittszeiten wird davon wesentlich bestimmt. Es ist zu untersuchen, ob es tatsächlich eine jeder phänologischen Phase zugeordnete allgemeine Temperaturempfindlichkeit gibt; weiters, ob die räumlichen und die zeitliche Temperaturempfindlichkeit zusammengeführt werden können, das heißt, auf dieselbe Ursache reduziert werden können (siehe Tryjanowski et al., 2006). Es wird vermutet, dass die Tagesamplitude der Temperatur oder/und auch die Temperaturschwankungen von Tag zu Tag und die daraus abgeleiteten Temperatursummen etwas mit der Temperaturempfindlichkeit der Phasen zu tun haben können. Auch die räumlichen Residuenmuster könnten damit auch in Zusammenhang stehen. Es ist zu untersuchen, ob phänologische Modelle die verschiedenen Temperaturempfindlichkeiten über zeitlich höher aufgelöste Temperaturzeitreihen erklären können.

Das räumliche Gradientengesetz der Phänologie soll mit phänologischen Daten aus einem größeren Raum validiert werden (z.B. aus COST 725).

Falls das räumliche Gradientengesetz in dieser Form aufrecht erhalten werden kann, ist es auf seine Anwendbarkeit zu überprüfen. Was für Konsequenzen ergeben sich daraus?

Vergleicht man Abb. 7 links mit Abb. 8 links, so fällt auf, dass der Gradient der Temperatur  $T_p$  eine Abnahme von West nach Ost anzeigt, während manche der dazugehörigen Phasen doch früher im Osten einsetzen. Warum?

## 4. Ziel 1: Komplexe Topographie und phänologische Eintrittszeiten

**Die komplexe Topographie Österreichs ist Ursache für lokale klimatische Besonderheiten, die ihrerseits die räumliche Verteilung der phänologischen Eintrittsdaten beeinflusst. Die räumliche Verteilung der Residuen des räumlichen multiplen Regressionsmodells der langjährigen mittleren Eintrittsdaten werden nach wiederkehrenden Mustern untersucht, die als topographische Modulation durch das lokale Klima interpretiert werden können. Derartige Muster sind auch bei der Temperatur zu suchen.**

**Falls das räumliche multiple Regressionsmodell in der Lage ist, einen relative hohen Prozentsatz der räumlichen Variabilität der langjährigen mittleren Eintrittsdaten zu erklären (> 70%), sollen Karten der langjährigen mittleren Eintrittsdaten hergestellt werden. Sind die**

**Residuenmuster aus der vorausgegangenen Untersuchung sinnvoll, sollen sie zur Verbesserung des räumlichen Interpolationsverfahrens herangezogen werden. Die räumliche Verteilung der langjährigen mittleren Eintrittsdaten der phänologischen Phasen wird als Funktion der Temperatur (Tage/°C) interpretiert.**

Für dieses Kapitel stand ein weiterer Temperaturdatensatz aus dem ECSN/HRT – GAR Projekt (European Climate Support Network/High Resolution Temperature, Greater Alpine Region) mit einer hohen räumlichen Auflösung zur Verfügung, nämlich langjährige mittlere monatliche Temperaturwerte von 386 österreichischen Stationen aus dem Zeitraum 1961 – 1990. Das folgende MLR Modell diente zur Berechnung der räumlichen Residuen der Temperatur:

$$R_i = (a_1 + a_2 \lambda_i + a_3 \varphi_i + a_4 z_i) - Y_i, \quad (11)$$

mit den Stationen  $i=1, \dots, n$ , der geografischen Länge  $\lambda_i$ , der geografischen Breite  $\varphi_i$  und der Stationshöhe  $z_i$ .  $Y_i$  ist das langjährige mittlere Eintrittsdatum (1951 – 2005) oder die zur phänologischen Phase gehörige langjährige mittlere Temperatur  $T_p$  (1961 – 1990) und  $a_1, a_2, a_3$  and  $a_4$  die Regressionskoeffizienten.

#### 4.1. Residuen der ECSN Temperaturen

Betrachtet man die räumliche Verteilung der Temperaturresiduen eines jeden Monats, so erkennt man, dass die besonderen Merkmale der räumlichen Verteilung während des ganzen Jahres ziemlich ähnlich aussehen. Daher werden die Verteilungen für das Sommer- (4 – 9) und Winterhalbjahr (10 – 12, 1 – 3) in Abb. 14 dargestellt.

Hier kann vorerst nur eine spekulative Erklärung des möglichen physikalischen Hintergrundes, der die beobachteten räumlichen Verteilungen der Residuen verursacht, gegeben werden. Die bodennahe Temperatur wird im wesentlichen durch advektive und radiative Vorgänge gesteuert. Während der warmen Jahreszeit wird die kurzweilige Einstrahlung hauptsächlich durch die Bewölkung und die Bewölkung ihrerseits durch das Zusammenspiel von Luftströmung, Feuchte und Topographie bestimmt. In gewissem Ausmaß könnten die positive Temperaturresiduen (modelliert – beobachtet, die modellierten Werte sind zu hoch, blau eingefärbt, Abb. 14) mit Gebieten hoher Bewölkungs- und Niederschlagshäufigkeit am Nordrand der Alpen und im Waldviertel verbunden sein. Alle Gebiete mit geringer Bewölkung und geringerem Niederschlag im Lee der böhmischen Masse (Weinviertel) und des Alpenhauptkammes sind mit negativen Temperaturresiduen verbunden (rot, die modellierten Werte sind geringer als die beobachteten). In der kalten Jahreszeit bedeuten geringe Bewölkung und häufige Schneebedeckung tiefe Nachttemperaturen und tiefe Tagesminima und daher positive Residuen (blau eingefärbt). Die davon betroffenen Gebiete sind das Mühl- und Waldviertel und die inneralpinen Tal- und Beckenlagen. Eine hohe Niederschlags- und Bewölkungshäufigkeit und häufige Beeinflussung durch vergleichsweise warme maritime Luftmassen erzeugt negative Residuen (rot eingefärbt). Warum die Residuen in Ostösterreich stark negativ sind (rot), lässt sich nicht unmittelbar einsehen. Dieselben physikalischen Vorgänge können im Sommer positive und im Winter negative Temperaturresiduen verursachen.

#### Weitere Untersuchungen

Es geht hier um eine physikalische Beschreibung und ein physikalisches Verständnis der räumlichen Temperaturverteilung. Residuenfelder eines einfachen MLR Modells auf Grundlage der räumlichen Stationsverteilung ist ein durchaus brauchbares Instrument für diesen Zweck. Die hier gegebene spekulative Erklärung der räumlichen Temperaturresiduenmuster ist mit zeitlich hoch aufgelösten Beobachtungen (stündlich) zu quantifizieren. Die Ergebnisse der regionalen Klimamodellierung mit REMO aus dem ALP-IMP Projekt (5th Framework Programme of the European Commission under the key action Global Change, Climate and Biodiversity, EVK2-CT-00148) sind zur Unterstützung der Lösung dieser Aufgabe heranzuziehen.

#### 4.2. Residuen der phänologischen Eintrittszeiten

Bisher wirkten die subjektive Art der Beobachtung der phänologischen Eintrittszeiten und das räumlich wenig dichte phänologische Netzwerk auf eine genauere Untersuchung der Residuen der phänologischen Eintrittszeiten im Raum eher abschreckend. Daher überraschte uns die relative gute

Übereinstimmung der Residuenmuster der phänologischen Phasen mit denjenigen der Temperatur (Abb. 15). Für die Abbildung 15 wurden 21 Frühjahrs- und Sommerphasen ausgewählt und die mittleren Residuen der phänologischen Phasen und der dazugehörigen Korrespondenztemperatur  $T_p$  berechnet und dargestellt. In 2 Gebieten widersprechen sich die Residuen der phänologischen Phasen und die der Temperatur, nämlich im Inntal und in Salzburg.

Da die räumlichen Residuenmuster der Temperatur und der phänologischen Phasen gut zusammenpassen, kann ausgeschlossen werden, dass die phänologischen Residuenmuster ausschließlich von kleinklimatischen Besonderheiten der phänologischen Stationen bestimmt werden. Daher sind regionale klimatische Abweichungen vom erwarteten mittleren räumlichen Muster für die beobachteten phänologischen Residuenmuster verantwortlich. Abb. 13 zeigt die Beziehung zwischen den phänologischen Residuen und den Temperaturresiduen. Die Beziehung ist nicht besonders streng ( $RSQ = 0.19$  ohne Ausreißer), aber klar erkennbar. Die phänologischen Phasen scheinen in verschiedenen Gebieten unterschiedlich auf die Temperaturresiduen zu reagieren (Abb. 15 oben). Die Ähnlichkeit zwischen den Temperaturresiduen und den phänologischen Residuen im NO Österreichs ist im Sommer besonders groß, während die winterlichen Temperaturresiduen eher den phänologischen Residuen in Landesmitte entsprechen.

### 4.3. Residuen und Interpolation

Die Interpolation über die höhenreduzierte inverse Distanzgewichtung (IDW) interpoliert zuerst die Residuen der Höhenregression und berechnet dann den Wert an dem zu interpolierenden Punkt über die Höhenregression.

Im Vergleich mit dem Residuenfeld der Temperatur erscheint das Residuenfeld einer einzelnen phänologischen Phase sehr unruhig (Abb. 14 und Abb. 16). Daher ist die Frage bisher noch ungelöst, ob die phänologischen Phasen über ihre individuellen Residuenfelder interpoliert werden sollen oder ob es günstiger ist, über mittlere und daher glattere Residuenfelder mehrerer Phasen zu interpolieren. Als Beispiel wurde hier ‚Schneeglöckchen Beginn der Blüte‘ ausgewählt und das Residuenfeld, die Interpolation über das MLR – Modell und die Interpolation über das MLR – Modell in Kombination mit dem Residuenfeld dargestellt (Abb. 16). Der Vergleich der mittleren und unteren Abbildung demonstriert die Wirkung der Berücksichtigung des Residuenfeldes. Der Höhengradient der Eintrittsdaten von ‚Schneeglöckchen Beginn der Blüte‘ beträgt 35 Tage/1000 m, während die Residuen einen Wertebereich von  $\pm 10$  Tagen aufweisen, der einem Höhenbereich von 300 m entspricht. Die Residuen stellen also einen Faktor dar, der bei der Interpolation nicht vernachlässigt werden darf.

Die Darstellung der Residuen in Abb. 16 offenbart Stationen mit außergewöhnlich großen Abweichungen oder Ausreißern. Trotz einer gewissen Datenprüfung ist es nicht möglich, alle Ausreißer zu finden und automatisch auszuschließen. Daher bleibt die Datenprüfung in gewissem Ausmaß eine Handarbeit. Derartige Ausreißer können ein Hinweis auf fehlerhafte Daten oder ein besonderes Mikroklima sein, dem die beobachteten Pflanzen ausgesetzt sind. Karten der Eintrittszeiten weiterer Phasen sind in Abb. 50 dargestellt.

#### Weitere Untersuchungen

Ein phänologisches Modell in Kombination mit den Ergebnissen aus den Temperaturempfindlichkeitsuntersuchungen soll zur Verbesserung der räumlichen Interpolation der Eintrittszeiten hergestellt werden. Die für die Eintrittszeiten der Phasen relevanten Temperaturparameter werden räumlich hoch aufgelöst interpoliert oder modelliert und auf diese Temperaturfelder setzen dann die phänologischen Modelle auf.

### 4.4. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Das MLR – Modell vermag die räumliche Variabilität der phänologischen Eintrittszeiten wenn auch zu einem hohen Grad (in vielen Fällen  $> 70\%$ ) aber doch nicht vollständig zu beschreiben. Hier stellt sich die Frage, ob es auf Grund topografischer und klimatischer Besonderheiten ein räumliches Residuenmuster phänologischer Eintrittszeiten gibt, das nicht durch das MLR – Modell erfasst wird. Phänologische Phasen zeigen tatsächlich ein Residuenmuster, das von Phase zu Phase eine große Ähnlichkeit aufweist.



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 einen eingehendere Beschäftigung mit dem physikalischen Mechanismen, welche die räumliche Verteilung der phänologischen Eintrittszeiten und ihrer korrespondierenden Temperatursummen steuern.

## 5. Ziel 2: Kombinierte räumliche und zeitliche Analyse

**Phänologische Zeitreihen und Temperaturzeitreihen sollen in 3 Varianten verwendet werden: als rohe Zeitreihen, als geglättete und trendbereinigte Zeitreihen. Damit soll die Variabilität im Bereich von Jahrzehnten und die linearen Trends untersucht werden.**

**Vom Ziel 1: Die zeitliche Temperaturempfindlichkeit. Die Korrelation zwischen Temperatur- und Phänologiezeitreihen (Variabilität von Jahr zu Jahr und von Jahrzehnt zu Jahrzehnt) ist als Funktion des Raumes zu untersuchen.**

**Trendempfindlichkeit. Die linearen Trends der phänologischen Phasen und der Temperatur sollen als Funktion des Raumes miteinander verglichen werden. Es soll untersucht werden, ob die phänologischen Eintrittszeiten seit der Diskontinuität im Jahr 1989 weiterhin früher eintreten.**

**Es ist zu untersuchen, ob sich die Länge des Frühlings und die Länge der Vegetationsperiode in bezug auf Phänologie und Temperatur verändert haben.**

### 5.1. Ergebnisse

Der einfache lineare Trend über den gesamten Zeitraum einer Zeitreihe hat sich als wenig befriedigende und allzuvereinfachende Darstellung des langfristigen Verhaltens einer atmosphärischen Größe herausgestellt. Die Beziehung zwischen einem Trendwert und der Zeitreihe ist mehrdeutig, da unendliche viele Zeitreihen ein und denselben Trendwert erzeugen können. Durch Hinzufügen oder Abziehen eines oder mehrerer Elemente von bzw. zu einer Zeitreihe kann der lineare Trendwert leicht verändert werden. Es gibt mehrere Ansätze, um dieses Problem in den Griff zu bekommen. Die Trendmatrizendarstellung in Rapp (2000) kombiniert lineare Trendwerte aller denkbaren Zeitabschnitte einer Zeitreihe in einer Abbildung. Diese Darstellung ist leider schwer lesbar. Brunetti et al. (2005) versuchten dieselbe Information in einer etwas anderen Art darzustellen, die aber keineswegs leichter lesbar ist. Weiters wurde von Menzel und Dose (2005) ein Bayesscher Ansatz vorgeschlagen, um Änderungen des Trendverhaltens einer Zeitreihe mit einer Zahl von Knickpunkten zu beschreiben. Die Wahl der Knickpunkte oder Trendumkehrpunkte erscheint allerdings mit einer gewissen Willkür verbunden zu sein.

Hier soll eine weitere Alternative einer allgemeineren Beschreibung des Trendverhaltens einer Zeitreihe vorgestellt werden, die einige Vorteile der oben genannten Methoden in sich vereinigt und manche Nachteile vermeidet (Abb. 17 und 18). Es handelt sich um eine grafische Aufbereitung der Trendwerte, wobei Trends einer großen Zahl von Zeitabschnitten direkt mit der Zeitreihe selbst verglichen werden können. Selbst Zeitreihen mit einer recht großen Varianz können in ein leicht lesbares Trendwertemuster zerlegt werden. 2 frühe Phasen (Schneeglöckchen Beginn der Blüte und Haselstrauch Beginn der Blüte) ergeben beispielsweise 4 klar unterscheidbare Trendwertebereiche (bei einer Mindestzeitspanne von 10 Jahren). Die längsten Zeitabschnitte ergeben stabile Trendwerte von etwa -0.25 Tagen/Jahr. Das Hinzufügen der letzten Jahre (2000 – 2005) verringert die Trendwerte und die Signifikanz der Trendwerte. Weitere Trendzerlegungen sind in Abb. 21 dargestellt. Bei sämtlichen Phasen deuten die Trends 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.

Der Jahresgang der monatlichen Temperaturtrends wird von der korrespondierenden Temperatur und in gewissem Ausmaß auch von den phänologischen Phasen wiedergegeben (Abb. 18, 19 und 20). Die Trends der mittleren monatlichen Temperaturen sind durchwegs positiv und in vielen Monaten sehr positiv. Hohe Trendwerte fallen in den Zeitraum von 1 – 8 (außer 4) und geringere Trendwerte in die Monate 9 – 12 (außer 10). Die höchsten Trendwerte sind mit Fruchtreifephase verbunden, mittlere

Trendwerte mit den Frühjahrsphasen (Blattentfaltung und Blüte) während die Trends der Herbstphasen wenig klar sind (Abb. 18).

Um die zeitliche Veränderung der Vegetationsperiode zu erfassen, wurde eine Differenzzeitreihe aus 7 Laubaustriebsphasen (Spitzahorn, Rosskastanie, Birke, Lärche, Rotbuche, Stieleiche und Bergahorn) minus 2 Laubverfärbungsphasen (Rotbuche und Apfel) berechnet (Abb. 23). Insgesamt haben die Laubverfärbungsphasen ihr Eintrittsdatum im Herbst stärker zu früheren Zeitpunkten hin verschoben, als die Laubaustriebsphasen im Frühjahr, so dass insgesamt eine Verkürzung der Vegetationsperiode von etwa 1 Tag/Jahr über den 55 jährigen Zeitraum von 1951 – 2005 festzustellen ist. Die Länge der Vegetationsperiode schwankte zwischen 150 (1979) und 182 (1961) Tagen. Die Vegetationsperiode erreichte ihre größten Längen in der ersten Hälfte der gesamten Zeitperioden von 1951 – 2005 und wird seit dem Minimum von 1979 wieder länger. Allerdings ist das Verhalten der beiden Laubverfärbungsphasen nicht typisch; günstig wäre eine Zahl von weiteren Laubverfärbungsphasen für diesen Zweck. Einige Herbstphasen zeigen während der letzten Jahre eine Neigung zu späteren Eintrittsterminen, wie der Laubfall des Apfels und der Rotbuche (Abb. 22).

Der Zeitraum zwischen Blüte und Fruchtreife ist während der letzten Jahre deutlich geschrumpft, da die Fruchtreifephase ihre Eintrittszeiten rascher nach vorne verschoben haben, als die Blühphasen (Abb. 22). Beim Apfel -16 - -20 Tage/100 Jahre für frühreife Sorten; mittelreife und spätreife Sorten habe ihre Eintrittszeiten nicht in diesem Ausmaß verschoben. Marille -8 Tage/100 Jahre; Heidelbeeren -6 Tage/100 Jahre; Schwarzer Holunder -5 Tage/100 Jahre; Süßkirsche -23 Tage/100 Jahre. Die Fruchtreifephase reagieren offenbar besonders empfindlich auf Temperaturschwankungen.

Um das Verhalten der Trendwerte der phänologischen Phasen (1951 -2005) im Raum zu beschreiben, wurde die Abhängigkeit der Trends von der Stationshöhe in einem Streudiagramm dargestellt (Abb. 24 unten rechts). Die geringsten Trendwerte kommen etwa in Höhen von 400 m vor, während in geringeren und größeren Höhen die Trendwerte höher liegen. Die Trendwerte nehmen nur bei einigen wenigen Phasen mit der Höhe signifikant zu (Abb. 24 oben links und rechts, 90%), wobei es sich vornehmlich um Fruchtreifephase handelt (Süßkirsche, Heidelbeere, Marille und Rosskastanie Beginn der Blüte, Abb. 24 links unten). Die Temperatur erklärt 45% des vertikalen Temperaturgradienten der Phänophasen (Abb. 25).

Die Standardabweichung der mittleren österreichischen phänologischen Zeitreihen zeigt einen charakteristischen Jahresgang, der dem aus Scheifinger et al. (2002, Fig. 5b) sehr ähnelt (Abb. 26). Die Abhängigkeit der Standardabweichungen von der Stationshöhe zeigt ein ähnlich uneinheitliches Bild, wie das des Trends. Bei wenige Phasen nimmt die Standardabweichung mit der Höhe signifikant zu.

Die im Projektantrag erwähnte Verwendung geglätteter Versionen der phänologischen Zeitreihen hat sich durch die hier vorgestellte Trendanalyse erübrigt.

## Weitere Untersuchungen

Warum zeigen einige Phasen eine klare Trendzunahme bzw. auch Zunahme der Standardabweichung mit der Höhe, während andere Phasen mit sehr ähnlichen mittleren langjährigen Eintrittszeiten das nicht tun?

Prognose des Eintrittsdatums von Fruchtreifephase. Fruchtreifephase sind besonders temperaturempfindlich. Es wäre wirtschaftlich unter Umständen von recht großer Bedeutung, wenn die Obstplantagenbetreibern schon im Vorhinein ein mögliches Erntedatum wüssten. Das Eintrittsdatum der Obstreife als Funktion des Blühdatums mit einer erklärten Varianz bei Kirsche 36%, Holunder 80%, Heidelbeere 33%, Rotbuche (Blattentfaltung – Fruchtreife) 33%, Rosskastanie (Blattentfaltung – Fruchtreife) 20 %, Rosskastanie (erste Blüte – Fruchtreife) 66%, Marille 23%, Apfel (Erste Blüte – Reife früh) 33%, (erste Blüte – Reife mittel)38%, (erste Blüte – Reife spät) 11%. Vorschlag für eine Prozedur. Nach der Blüte wird die Temperatursumme laufend ergänzt und das Reifedatum vorausgerechnet. Je mehr sich die Zeit dem Reifedatum nähert, um so besser müssten die Vorhersagen werden.

## 6. Ziel 2: Kombinierte räumliche und zeitliche Analyse

Für die Maikäfer soll die Verschiebung der Flugintensitätsmaxima von 4 zu 3 jährigen Zyklen oder umgekehrt als Funktion der Temperatur über die letzten 50 Jahre analysiert werden.

### 6.1. Einleitung

Maikäfer spielten in der Landwirtschaft seit dem Mittelalter eine wichtige Rolle, wie sich aus Berichten über Massenvorkommen und Schäden an Obst- und Weinkulturen in Mitteleuropa schließen lässt. Im 19. Jahrhundert bemerkte man, dass es sich bei den massenhaften Auftreten um zyklische Ereignisse handelt. Daher wurde die Phänologie der Maikäfer vor allen anderen landwirtschaftlichen Schädlingen untersucht (Heer, 1841). Die ersten Quellen für eingehendere Untersuchungen des Maikäferauftretens stammten aus ländlichen Gebieten, in denen die Maikäfer durch Einsammeln von Schulkindern bekämpft wurden. In Österreich veröffentlichte Zweigelt im Jahr 1928 eine Karte, die Zyklen und Phasen des Fluges adulter Maikäfer zeigte (Zweigelt, 1928). Grundlage für die Karte waren seine persönlichen Beobachtungen, die bis ins Jahr 1913 zurück reichten. Er begann bereits ein Beobachtungssystem der Flugintensität adulter Tiere durch Lehrer und Kinder von Volksschulen einzurichten. Nach dem zweiten Weltkrieg dehnte Faber das Beobachtungsnetz auf 3000 Volksschulen im ganzen Land aus (Faber, 1951; Faber, 1961). Diese Daten wurden systematisch gesammelt und stehen heute in digitalisierter Form der Forschung zur Verfügung. Die Schäden durch Maikäfer sind während der letzten Jahrzehnte stark zurückgegangen. Ursprünglich dienten die phänologischen Aufzeichnungen dazu, das massenhafte Auftreten der Käfer vorherzusagen und sie so gezielter bekämpfen zu können. In neuerer Zeit stehen diese Daten auch der Klimaimpaktforschung zur Verfügung, um den Einfluss der Klimavariabilität auf die Insektenphänologie zu untersuchen.

### 6.2. Ergebnisse

Über den Zeitraum von 1949 – 2005 nahm die Zahl der Maikäferbeobachtungen um mehr als die Hälfte ab (Abb. 27 und 28). Nach dem Minimum um 1985 – 1995 steigen die Flugintensitäten wieder etwas an (Abb. 27 grüne Kurve und 28 rote und blaue Kurven). ‚Kein Maikäferflug‘ und ‚Vereinzelter Maikäferflug‘ sind mit ‚Schwacher Maikäferflug‘ und ‚Starker Maikäferflug‘ antikorreliert. Die Beobachtungen aller Intensitätskategorien nahmen bis in die Mitte der achtziger Jahre hin ab, außer ‚Kein Maikäferflug‘.

Auf Grund der starken Abnahme der Beobachtungen und Intensitäten wurde der gesamte Beobachtungszeitraum durch das Jahr 1984 in 2 Abschnitte geteilt. Die Zeitperiode von 1985 – 2005 besitzt leider derart wenige Daten, dass auf Grundlage der numerischen Analysemethoden über diesen Zeitraum kaum etwas ausgesagt werden kann.

Die Flugintensitäten zeigen eine charakteristische Verteilung in Österreich (Abb. 30). In vielen inneralpinen Tälern und über großen Gebieten werden eher wenig ausgeprägte Zyklen gefunden, während in Oberösterreich, Burgenland, der Untersteiermark und Kärnten die Zyklen recht markant ausfallen.

Die maximale Phasen- und Zyklusintensität  $c_{ij}$  des Zyklus  $i$  und der Phase  $j$  wurde so berechnet:

$$c_{ij} = \left[ \max \left| \bar{y}_{\text{phase} = j} - \bar{y}_{\text{phases} \neq j} \right|_{j = 1, i} \right]_i \quad (12)$$

In Österreich werden 3 und 4 jährige Zyklen beobachtet ( $i = 3, 4$ ), wobei für den 3 (4) jährigen Zyklus 3 (4) Phasen möglich sind  $j = 1, 3$  ( $j = 1, 4$ );  $y$  sind die Beobachtungen an einer Station über eine bestimmte Zeitperiode und  $\bar{y}_{\text{cycle} = i \text{ phase} = j}$  ist der Mittelwert aller Werte einer Zeitreihe bei einem bestimmten Zyklus und einer bestimmten Phase.

Eine Zeitreihe oder ein Zeitreihenabschnitt besitzt eine Phase  $j$  bei einem Zyklus  $i$ , wenn die Phase  $j$  einem maximale Differenz wie oben definiert aufweist, die gemäß t – Test signifikant ist (90% Niveau). Der t – Test vergleicht die Elemente der Phase  $j$  mit allen anderen Elementen der Zeitreihe, die nicht zur Phase  $j$  gehören. Die Abb. 31 gibt den Zyklus und die Phase des stärksten Zyklus wieder und Abb. 32 die maximale Zyklus- und Phasenintensität. Die Einfärbung lehnt sich an die Karten von Zweigelt

(1928) und Faber (1961) an (Abb. 33). Die Ergebnisse sind mit der Karte von Faber (1961) vergleichbar.

Es war leider nicht möglich, Stationen zu finden, die einen Zyklussprung von einem 3 zu einem 4 jährigen Zyklus oder umgekehrt während des Beobachtungszeitraumes aufweisen. Die Datendichte der letzten 20 Jahre ist für diesen Zweck zu gering. Außerdem muss man bedenken, dass die räumliche Ausdehnung der Gebiete, in denen ein derartiger Sprung vorkommen kann, sehr gering ist und nur eher zufällig die eine oder andere Station diesen Sprung anzeigen kann.

Um eine Verbindung zur Temperatur herzustellen, wurden die Sommertemperaturen (4 – 9) der Stationen der HISTALP (HISTORICAL INSTRUMENTAL CLIMATOLOGICAL SURFACE TIME SERIES OF THE GREATER ALPINE REGION 1760-2003, Auer et al., 2006) Datenbank an den Koordinaten der Maikäferstationen interpoliert. Stationshöhe und mittlere Sommertemperatur sind tatsächlich Faktoren, die den 3 und 4 jährigen Zyklus auseinander halten (Abb. 34 bis 37). Von 1949 – 1984 zeigten 1126 Stationen einen signifikanten 3 jährigen Zyklus (88% aller Stationen) und 139 Stationen einen signifikanten 4 jährigen Zyklus (12% aller Stationen). Die meisten der Stationen mit einem 3 jährigen Zyklus kommen zwischen 200 und 300 m Höhe vor mit einer mittleren Sommertemperatur von 15.25°C. Das entsprechende Maximum der Stationen mit einem 4 jährigen Zyklus wird zwischen 500 – 700 m bei einer Sommermitteltemperatur von 12.5°C gefunden.

Die Stationen sind nicht über alle Höhenstufen in gleicher Weise verteilt, so dass man bei Schlussfolgerungen aus den Häufigkeitsverteilungen vorsichtig sein muss (Abb. 34 bis 37). Was die Temperaturobergrenze des 3 jährigen und die Temperaturuntergrenze des 4 jährigen Zyklus betrifft, haben die Käfer keine Wahlmöglichkeit, sondern sind an den Höhen- und Temperaturbereich gebunden, der durch das österreichische Stationsnetz aufgespannt wird. Daher lässt sich nichts über den optimalen Temperatur- und Höhenbereich für die Käfer aussagen. Die einzige Wahlmöglichkeit, die sich für die Maikäfer bietet, lässt ihnen die Entscheidung über die Dauer des Entwicklungszyklus. Der Temperaturwert, der die Zykluslängen auseinander hält, liegt bei 13.75°C (Abb. 36). Dort überschneiden sich die relativen Häufigkeiten der 3 und 4 jährigen Zyklen. Die Häufigkeitsverteilung zeigt einen Temperatur- und Höhenbereich, wo beide Zyklenlänge vorkommen. Offenbar ist die Temperatur nicht der einzige Faktor, der die Zyklenlänge bestimmt.

Der Temperaturgradient, der mit dem 3 (4) jährigen Zyklus verbunden ist, beträgt -0.0052 (-0.0054) °C/m. Von größerer Bedeutung ist die Streuung der Datenpunkte, die mit abnehmender Temperatur zunimmt und andeutet, dass der Temperaturgradient in den diversen Unterregionen Österreichs unterschiedlich ist. Daher gibt es keine eindeutig festgelegte Höhe, in der der Wechsel vom 3 zum 4 jährigen Zyklus oder umgekehrt vorkommt. Im Waldviertel liegt die 13.75° Isotherme beispielsweise deutlich niedriger, als in den inneralpinen Gebieten. Mittelt man die Höhe der 13.75° Isotherme über den gesamten Alpenraum, so ergibt sich eine mittlere Höhe von 633 m für die Zeitperiode von 1913 – 1927 (auf Beobachtungen dieser Zeitperiode beruht die Zweigelt – Karte aus dem Jahr 1928), 706 m für die Zeitperiode von 1949 – 1984 (+ 73 m) und 821 m für die Zeitperiode von 1985 – 2005 (+ 115 m). Insgesamt hob sich die 13.75°C Isotherme im Zeitabschnitt von 1913-1927 bis 1985-2005 um 188 m (Abb. 42).

Tabelle 1: Regression der mittleren Sommertemperatur  $y$  (4-9) als Funktion der Stationshöhe  $x$ , über alle HISTALP (GAR) Stationen, erklärte Varianz der Regression, die Höhe der 13.75°C Isotherme und die mittlere Sommertemperatur.

Zeitabschnitt	Regressionsgleichung über alle HISTALP Stationen	Erklärte Varianz	Höhe der 'Kreuzungstemperatur' von 13.25°C (m)	Mittlere Sommertemperatur (°C, HISTALP Stationen > 0° und < 1000 m)
1913 – 1927	$y = 18.044313 - 0.006786716 x$	0.88	633	15.69
1949 – 1984	$y = 18.478520 - 0.006696972 x$	0.91	706	16.17
1985 – 2005	$y = 19.212949 - 0.006650143 x$	0.92	821	17.10
1901 – 2005	$Y = 18.409414 - 0.006719788 x$	0.90	693	16.25

Für Österreich existieren Maikäferzyklenkarten aus 2 historischen Perioden, die erste beruht auf Daten von Zweigelt (1928) aus dem Zeitraum von 1913 – 1927 und die zweite stammt von Faber (1961) auf Grundlage von Daten von 1950 – 1960. Vergleicht man die Maikäferzyklenkarten aus dem

Jahr 1928 mit der 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.

Die Regressionen der Tab. 1 gestatten die räumliche Interpolation der Sprungtemperatur von 13.75°C auf einem digitalen Höhenmodell (DEM), die mit der räumliche Verteilung der 3 und 4 jährigen Zyklen nach Zweigelt und Faber verglichen wird (Abb. 38). Der Vergleich zwischen der Karte von Zweigelt und von Faber, der Stationsanalyse (1949 – 1984) und der 13.75°C Isotherme wird in Tab. 2 zusammengefasst.

Tab. 2: Vergleich der Gebiete mit dem 4 jährigen Entwicklungszyklus der Maikäfer in der Karte von Zweigelt (1928) und Faber (1961) mit der räumlichen Verteilung berechnet mit der Sprungtemperatur von 13.75°C. Die Gebietsnummern sind auf der Karte in Abb. 39 eingetragen.

Gebiet	Vergleich Zweigelt (1928) mit der 13.75°C Karte	Vergleich Faber (1961) mit Stationen (1949 – 1984)	Vergleich Faber (1961) mit der 13.75°C Karte
1. Lechtal	gut	Bleibt ein Gebiet mit einem 4 jährigen Zyklus	
2. Inntal	Nach der 13.75°C Isothermenverteilung sollte der 3 jährige Zyklus im mittleren Inntal anzutreffen sein, das Modell ist zu warm	Der 3 jährige Zyklus reicht nun in das Inntal hinein	Gute Übereinstimmung zwischen der Faberkarte, den Stationen und dem Temperaturmodell
3. Saalfelden und oberes Salzachtal	Der 3 jährige Zyklus fehlt um Bischofshofen, das Temperaturmodell ist etwas zu kühl	Keine Beobachtungen	Keine Beobachtungen
4. Salzkammergut	Das kleine Gebiet mit 3 jährigen Zyklen fehlt in Abb. 38	Wenige Stationen mit 3 jährigen Zyklen	Ein Gebiet mit einem 4 jährigen Zyklus scheint in der Faberkarte auf (die Farbe ist schwer zu identifizieren) in Übereinstimmung mit der Isothermenkarte
5. Iseltal, oberes Drautal und Mölltal	gut	Gut	Gut
6. Friesach	Grenzfall, recht gut	Gut	Gut
7. Mur- und Mürztal	gut	Gut	Gut
8. Waldviertel	gut	Gut	Gut

Die 13.75° Isotherme platziert die meisten Stationen entsprechend ihrer Zyklusdauer in das richtige Gebiet (Abb. 38 Mitte). Leider gibt es nur wenige Stationen mit signifikanten Zyklen aus der Zeitperiode von 1985 – 2005. Während dieses Zeitraums findet man Stationen im Inntal, die noch immer einen 4 jährigen Zyklus aufweisen, obwohl sie laut 13.75°C Isotherme einen 3 jährigen Zyklus haben sollten.

Vergleicht man die Karten von Zweigelt (1928) und Faber (1961) 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 (Abb. 31 und 33). Die 2 m Lufttemperatur vermag einen großen Teil der räumliche Varianz der 3 und 4 jährigen Zyklen zu erklären, obwohl die Bodentemperatur für diese Aufgabe wahrscheinlich besser geeignet ist. Berücksichtigt man neben der Lufttemperatur weitere Faktoren, wie das Nahrungsangebot, Bodeneigenschaften, Bodentemperaturen, die Wärmekapazität des Bodens und die Bodenfeuchte, so sollten sich die Differenzen zwischen den vorhergesagten und beobachteten Zyklenlängen, wie sie in der Tab. 2 aufgelistet sind, erklären lassen.

### Weitere Untersuchungen

Einige wenige Stationen in Österreich messen die Bodentemperatur. Es ist zu prüfen, ob die Verwendung der Bodentemperatur, wenn auch mit geringerer räumlicher Dichte, einen Vorteil gegenüber der 2 m Hüttentemperatur für die Maikäferuntersuchungen bringt.

Die Beziehung zwischen Atmosphäre und Maikäferflugintensitäten wurde in dieser Arbeit nicht berührt. Hier ist zu untersuchen, in welcher Weise und wie sehr die Atmosphäre die Flugintensitäten steuert und ob es zu Phasensprüngen kommen kann; dass beispielsweise bei zu kalten Verhältnissen die Tiere erst im darauf folgenden Jahr fliegen.

Warum werden viele der inneralpinen Stationen bei der numerischen Auswahl ausgeschlossen? (Abb. 29 und Abb. 38).

Was für eine Beziehung besteht zwischen den Maikäferbeobachtungen der ZAMG ('Erstes Erscheinen') und den Maikäferflugintensitäten der AGES?

## 7. Ziel 3: Phänologie und künftige Klimaszenarien

Um die Wirkung möglicher künftiger Klimaszenarien, wie sie von Klimamodellen berechnet werden, auf phänologische Vorgänge anzuwenden, wird eine statistische Regionalisierungsmethode eingesetzt, um die großskalige Zirkulation mit den phänologischen Zeitreihen zu verknüpfen (Matulla et al., 2003). Für eine ausgewählte Zahl von phänologischen Phasen wird ein empirisches Modell auf Grundlage der Kanonischen Korrelationsanalyse (CCA, von Storch and Zwiers, 1999) entwickelt, validiert und auf zwei Klimaszenarien angewendet (ECHAM4/OPYC3 IS92aGHG und IS92aGSD). Karten der Änderung der phänologischen Eintrittsdaten in möglichen künftigen Klimaszenarien werden gezeichnet.

### 7.1. Einleitung

Die steigenden Temperaturen der letzten Jahrzehnte führten nachweislich zu einer Vorverschiebung der Eintrittsdaten vieler Frühlings- und Sommerphasen in Europa (Menzel et al., 2006). Es wird befürchtet, dass sich die beobachteten Temperaturtrends in der Zukunft fortsetzen könnten. Die möglichen Wirkungen eines steigenden Temperaturtrends auf Ökosysteme sollte möglichst im Vorhinein abgeschätzt werden. Nur verlässliche Punktinformation kann die Breite möglicher künftiger Entwicklungen einschränken. Obwohl die räumliche Auflösung der Klimamodelle stetig zugenommen hat, ist es immer noch notwendig, Regionalisierungsverfahren anzuwenden, um lokale Klimainformation für die Klimawirkungsforschung zur Verfügung zu stellen.

Die gängigsten 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. Damit ist es möglich, lokalskalige ökologische Variablen mit großskaligen atmosphärischen Variablen direkt mittels empirischer Verfahren zu verknüpfen. Das Ziel dieser Studie ist die Anwendung eines derartigen ‚direkten Regionalisierungsverfahrens‘ auf Zeitreihen phänologischer Phasen in Österreich unter Vorgabe von 2 Klimaszenarien (SRES A1B und B1, Nakicenovic and Swart, 2000).

### 7.2. Datensätze

Seit 1951 sammelt die ZAMG Beobachtungen von 244 pflanzen- und tierphänologischen Phasen an insgesamt 284 Stationen (Abb. 2 und 3). Wendet man das Kriterium an, dass mindestens 20 Beobachtungen pro Phase und Station für eine gültige Zeitreihe vorliegen müssen, bleiben etwa 45 Phasen mit bis zu 73 Stationen übrig (Abb.4). Der Datensatz umfasst 55 Jahre, die ausreichen, um ein CCA Modell (kanonische Korrelationsanalyse) anzupassen. Auf Grund der großen Zahl von Phasen, werden alle wichtigen Zeitabschnitte der Vegetationsperiode erfasst. Die Stationshöhen reichen von 100 bis 1400 m, wodurch Schlussfolgerung über das räumliche Verhalten der Phasen ermöglicht werden.

Als großskalige Felder wurden die relative Topographie (500 hPa – 850 hPa) und die spezifische Feuchte in 850 hPa verwendet. Für Beobachtungsperiode wurden diese Felder aus der NCEP/NCAR Datenbank entnommen (Kalnay et al., 1996), während für den Zeitabschnitt des Szenarios (2006 – 2100) die Felder von den Ensemble Experimenten herangezogen wurden, die mit ECHAM5/OPYC3 für zwei Szenarios durchgeführt wurden (B1 und A1B).

### 7.3. Ergebnisse

Die Ergebnisse der Kreuzvalidierung der CCA sind in Abb. 44 dargestellt. Um einen Eindruck zu vermitteln, wie sich die Eintrittszeiten in den Ensembles der Szenarienrechnungen ändern, wurden die Zeitreihen und die Häufigkeitsverteilungen der Eintrittszeiten von ‚Schneeglöckchen erste Blüte‘ in Abb. 45 links und rechts gezeichnet.

Die mögliche künftige Verschiebung der Eintrittszeiten zerfällt in 3 Kategorien, wobei die Frühjahrsphasen um 5 bis 10 Tage früher auftreten (mittlere langjährige Eintrittszeiten Jahrtag 50 – 180), die sommerlichen Reifephase um bis zu 15 Tage früher auftreten (mittlere langjährige Eintrittszeiten Jahrtag 180 -230) und die Herbstphasen ein unklares Verhalten zeigen (Jahrtag 230 – 300; Abb. 46).

Die jahreszeitliche Verteilung der Verschiebung der Eintrittszeiten der Klimaszenarien in Abb. 46 erinnert an die jahreszeitliche Verteilung der Trendwerte in Abb. 18, wobei aber keine Korrelation zwischen den beiden Faktoren festzustellen ist. Aber zwischen den Trendwerten der letzten 20 Jahre (1986 – 2005) und der Verschiebung der Eintrittszeiten der Klimaszenarien ist eine gemeinsame Varianz von 17% (19%) mit dem Szenario B1 (A1B) zu sehen (Abb. 47). Man kann diese Beziehung als Hinweis interpretieren, dass die während der letzten 20 Jahre beobachteten Trendwerte bereits eine Eigenschaft darstellen, die sich in den Klimaszenarien während der nächsten Jahrzehnte fortsetzen wird. In gewisser Weise kann ein derartiges Ergebnis erwartet werden, da das CCA – Modell auf Grundlage der Daten von 1951 – 2005 angepasst wurde, ein Zeitraum, der auch die letzten 20 Jahre mit einschließt. Auf der anderen Seite ist eine Beziehung, wie in Abb. 47, nicht notwendigerweise eine Konsequenz der Regionalisierungsprozedur.

Die aus den Klimaszenarien abgeleiteten Verschiebungen der Eintrittszeiten können auch als Trendwerte zwischen den Zeitintervallen 1951-2005 und 2050-2100 interpretiert werden, also als Trendwerte über eine etwa 100 jährige Zeitperiode (Abb. 47 und 48). Sie fallen geringer aus, als die Trends der letzten 55 oder 20 Jahre. Entweder sind die Trendwerte der letzten 20 oder 55 Jahre nicht repräsentativ und sehr von einer gewissen Zufälligkeit behaftet oder die Klimaszenarien sind nicht repräsentativ. Die beobachteten Trends der letzten 20 oder 55 Jahre können im Rahmen der berechneten Klimaszenarien schwer eingeordnet werden. Die zur Zeit beobachteten Eintrittsdaten sind in Relation zu den berechneten Klimaszenarien zu früh und sollten erst in Jahrzehnten das heutige Niveau erreicht haben.

Weder die räumliche Verteilung der Verschiebung der Eintrittszeiten einzelner Phasen noch eine Mittelung über mehrere Phasen lässt ein regelmäßiges räumliches Muster erkennen. Die Stationshöhe zeigt ebenfalls keinen offensichtlichen Einfluss auf die Verschiebung der Eintrittszeiten der Szenarien.

### **Weitere Untersuchungen**

Der Einfluss des massiven Trends nach 1989 auf das CCA – Modell ist zu evaluieren. Das CCA – Modell ist am Zeitabschnitt 1951 – 1988 anzupassen, anzuwenden und die Unterschiede der Ergebnisse zur Anwendung über den gesamten Zeitraum festzustellen. Damit sollte klar werden, ob der Trend der letzten 20 Jahre bereits als Teil der Szenarien zu betrachten ist.

Die Regionalisierung ist auf einen phänologischen Datensatz anzuwenden, der auf ein regelmäßiges Gitter interpoliert wurde. Dadurch wird eine gewisse Glättung der Zeitreihen und eine Verbesserung der Beziehung zu den großräumigen Feldern atmosphärischer Variablen erwartet. Hier ist zu überprüfen, ob dann doch eine räumliche Differenzierung der Verschiebung der Eintrittszeiten der Szenarien zu beobachten ist.



## 8. Ziel 4. Kombinierte entomologische und klimatologische Evaluierung der Ergebnisse

Obwohl die Temperatur das erste Auftreten von Insekten zu steuern scheint, zeigen die linearen Trends der Insektenphasen im allgemeinen das entgegengesetzte Vorzeichen der Temperaturtrends im Frühjahr. Es soll untersucht werden, ob der mögliche Grund dafür atmosphärischer oder nicht – atmosphärischer Natur ist.

Aus der Arbeit von Scheifinger et al. (2005) ist hervorgegangen, dass die Variabilität der Eintrittszeiten der insektenphänologischen Phasen zwar recht hoch mit der Temperatur  $T_p$  korreliert ist, aber die langfristigen Trends einander entgegengesetzt sind. (Abb. 49). Bei den pflanzenphänologischen Phasen werden die Variabilität von Jahr zu Jahr und der langfristige Trend der Eintrittszeiten von der Temperatur gesteuert und beide statistischen Kenngrößen zeigen ein übereinstimmendes Verhalten. In England und Schottland beispielsweise stimmen der langfristige Trend der Temperatur und des ersten Auftretens der Schmetterlinge überein (Sparks et al., 2006). Da bei den tierphänologischen Phasen neben der Temperatur noch weitere nicht atmosphärische Faktoren die Eintrittszeiten steuern, ist es aber durchaus denkbar, dass die langfristigen Trends der Temperatur und der tierphänologischen Eintrittszeiten nicht korrelieren. So kann die Populationsdichte bei den mobilen Tieren wesentlich die Beobachtungswahrscheinlichkeit beeinflussen (Tryjanowsky und Sparks, 2001).

Im Rahmen dieser Arbeit war es nicht möglich, derartige Faktoren einzugrenzen und Hinweise auf nicht atmosphärische Faktoren zu finden, welche die langfristige Entwicklung der insektenphänologischen Eintrittszeiten beeinflussen. Es wird der weitere Verlauf der Eintrittszeiten der insektenphänologischen Phasen in den nächsten Jahren nach der Beobachtungslücke von 2000 bis 2005 zu beobachten sein. Die Daten vom Frühjahr 2006 weisen auf spätere Eintrittsdaten hin, während die heurigen Eintrittszeiten deutlich früher ausgefallen sind, soweit sich das aus den Beobachtungen aus dem Phänologiewebportal der ZAMG erkennen lässt.

## 9. Ziel 4. Kombinierte entomologische und klimatologische Evaluierung der Ergebnisse

Der Zusammenhang zwischen den Maikäferzyklen und der Variabilität des Klimas ist gemeinsam mit möglichen zukünftigen Änderungen der Insektenphänologie in zu erwartenden künftigen Klimaszenarien zu evaluieren.

Während des zwanzigsten Jahrhunderts haben sich die Gebiete mit 3 jährigen Zyklenlängen auf Kosten der Gebiete mit 4 jährigen Zyklenlängen ausgedehnt. Berücksichtigt man den Einfluss eines weiteren künftigen Temperaturanstiegs, so ist zu erwarten, dass sich dieser Trend fortsetzt. Aus der Vorverschiebung der phänologischen Phasen, berechnet auf Grundlage der Szenarien SRES B1 und A1B ([http://ipcc-ddc.cptec.inpe.br/ipccddcbr/html/cru\\_data/examine/non\\_climate/sresa1.html](http://ipcc-ddc.cptec.inpe.br/ipccddcbr/html/cru_data/examine/non_climate/sresa1.html)) in dieser Arbeit, und einer typischen Temperaturempfindlichkeit von Frühlingsphasen von -5 Tagen/°C (Abb. 270), kann man einen Temperaturanstieg von 1 – 3°C von 1951-2005 bis 2050-2100 in Österreich erwarten (Abb. 43). Falls sich keine Verschiebung des Verbreitungsgebietes der Maikäfer ergibt, beispielsweise durch vermehrte Sommertrockenheit, dann ist die Wahrscheinlichkeit sehr hoch, dass die Gebiete mit 4 jährigen Entwicklungszyklen bis zum Jahr 2100 verschwunden sein werden.

## 10. Literatur

- Auer, I., R. Böhm, A. Jurkovic, W. Lipa, A. Orlik, R. Potzmann, W. Schöner, M. Ungersböck, C. Matulla, K. Briffa, P. Jones, D. Efthymiadis, M. Brunetti, T. Nanni, M. Maugeri, L. Mercalli, O. Mestre, J. Moisselin, M. Begert, G. Müllerwestermeier, V. Kveton, O. Bochnicek, P. Stastny, M. Lapin, S. Szalai, T. Szentimrey, T. Cegnar, M. Dolinar, M. Gajic-Capka, K. Zaninovic, Z. Majstorovic and E. Nieplova (2006): HISTALP – Historical Instrumental climatological Surface Time series of the greater ALPine region 1760 – 2003. *International Journal of Climatology*, **27(1)**, 17-40.
- AR4 (2007): Climate Change 2007: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. <http://www.ipcc.ch/SPM2feb07.pdf>.
- Böhm, R., I. Auer, M. Brunetti, M. Maugeri, T. Nanni and W. Schöner (2001): Regional Temperature Variability in the European Alps: 1760 – 1998 from homogenized instrumental time series. *Int. J. Climatol.*, **21(14)**, 1779-1801.
- Faber, W. (1951): Die Maikäferflugjahre in Österreich. *Pflanzenarzt* 4(2), Sondernummer 1-2
- Faber, W. (1961): Ergebnisse 10-Jähriger Erhebungen über die Flugjahre des Maikäfers (*Melolontha melolontha* und *Melolontha hippocastani*) in Österreich. *Pflanzenschutzberichte* 27(1/10): 101-146.
- Heer, O. (1841): Über geographische Verbreitung und periodisches Auftreten der Maikäfer. *Verh. d. Schweiz. Naturforsch. Gesellschaft* 1841
- Nakicenovic, N. and R. Swart (ed.) (2000): Special Report on Emissions Scenarios (SRES). Cambridge University Press, 599pp.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, Collins W, Deaven D, Gandin L, Iredell M, Saha S, White G, Woollen J, Zhu Y, Chelliah M, Ebisuzaki W, Higgins W, Janowiak J, Mo KC, Ropelewski C, Wang J, Leetmaa A, Reynolds R, Jenne R and D Joseph D (1996): The NCEP/NCAR reanalysis project. *Bull Am Meteorol Soc*, **77**, 437– 471
- Maak K, H von Storch (1997): Statistical downscaling of monthly mean air temperature to the beginning of flowering of *Galanthus nivalis* L. in Northern Germany. *Int J Biometeorol*, **41**, 5–12
- Matulla, Ch. , H. Scheifinger, A. Menzel, E. Koch (2003): Exploring two methods for statistical downscaling of Central European phenological time series. *Int. J. of Biometeorol.*, **48**, 56-64
- Menzel, A. (2002): Phenology: its importance to the Global Change community – An Editorial Comment. *Climatic Change*, **54**, 379 – 385.
- Menzel, A., and V. Dose (2005): Analysis of long-term time series of the beginning of flowering oby Bayesian function estimation. *Meteorologische Zeitschrift*, **14 (3)**, 429-434.
- Menzel A., T. H. Sparks, N. Estrella, E. Koch, A. Aasa, R. Ahas, K. Alm-Kübler, P. Bissolli, O. Braslavska, A. Briede, F. M. Chmielewski, Z. Crepinsek, Y. Curnell, A. Dahl, C. Defila, A. Donnelly, Y. Filella, K. Jatczak, F. Mage, A. Mestre, Ø. Nordli, J. Penuelas, P. Pirinen, V. Remisova, H. Scheifinger, M. Striz, A. Susnik, A. J. H. Van Vliet, F. Wielgolaski, S. Zach and A. Züst (2006): European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global Change Biology*, **12 (10)**, 1969 - 1976; doi:10.1111/j.1365-2486.2006.01193.xVolume 12 Issue 10
- Parmesan, C. and G. Yohe (2003): A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, **421**, 37-42.
- Rapp, J., (2000): Konzeption, Problematik und Ergebnisse klimatologischer Trendanalysen für Europa und Deutschland. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes*, 212, 145 pp.
- Root, T. L., J. T. Price, K. R. Hall, St. Schneider, C. Rosenzweig and A. Pounds (2003): Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature*, **421**, 57-60.
- Scheifinger, H. , A. Menzel, E. Koch, Ch. Peter and R. Ahas (2002): Atmospheric Mechanisms Governing the Spatial and Temporal Variability of Phenological Observations in Central Europe. *Int. J. Climatol.*, **22**, 1739-1755.
- Scheifinger, H., H. Winkler and E. Koch (2005): Results of a first look into the Austrian animal phenological records. *Meteor. Zeitschrift*, **14(2)**, 203-209.
- Sparks, T. H. and A. Menzel (2002): Observed Changes in Seasons: an Overview. *Int. J. Climatol.*, **22**, 1715-1725.

Sparks, T.H., Collinson, N., Crick, H., Croxton, P., Edwards, M., Huber, K., Jenkins, D., Johns, D., Last, F., Maberly, S., Marquiss, M., Pickup, J., Roy, D., Sims, D., Shaw, D., Turner, A., Watson, A., Woiwod, I. and Woodbridge, K. (2006). Natural Heritage Trends of Scotland: phenological indicators of climate change. Scottish Natural Heritage Commissioned Report No. 167 (ROAME No. F01NB01).

TAR (2001): Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J. T., Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell and C. A. Jonson (eds)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881. pp.

Tryankowski, P., T. H. Sparks (2001): Is the detection of the first arrival date of migrating birds influenced by population size? A case study of the red-backed shrike *Lanius collurio*. – *Int. J. Biometeor.* **45**, 217–219.

Tryjanowski, P., M. Panek and T. Sparks (2006): Phenological response of plants to temperature varies at the same latitude: case study of dog violet and horse chestnut in England and Poland. *Climate Research*, **32**, 89-93.

Von Storch, H., and F. Zwiers (1999): *Statistical Analyses in Climate Research*. Cambridge University Press, UK, 484 pp.

Walther, G.-R., E. Post, P. Convey, A. Menzel, C. Parmesan, T. J. C. Beebee, J.-M. Fromentin, O., Hoegh-Guldberg and F. Bairlein (2002): Ecological responses to recent climate change. *Nature*, **416**, 389-395.

Zweigelt, F., (1928): *Der Maikäfer*. Monographien zur Angewandten Entomologie Band 9, Beihefte zur Zeitschrift für angewandte Entomologie.