

UNIVERSITÄT HOHENHEIM

Institut für Landschafts- und Pflanzenökologie

Fachgebiet Landschaftsökologie und Vegetationskunde

Prof. Dr. Reinhard Böcker und Dr. Ingo Holz



Die Phänologie Hohenheims in Abhängigkeit klimatischer Faktoren

Diplomarbeit von
Steffen Ehrmann

Stuttgart-Hohenheim, im Oktober 2011

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	4
2	Stand der Wissenschaft	6
2.1	Zeitliche Entwicklung der Phänologie und Wissensstand	6
2.1.1	Geschichtlicher Abriss	6
2.1.2	Wissenschaftliche Erkenntnisse	7
2.1.3	Aktuelle Fragestellungen	10
2.1.4	Fragestellung dieser Arbeit	12
2.2	Methoden und Werkzeuge der Phänologie	13
2.2.1	Sammlung phänologischer Daten	13
2.2.2	Darstellung phänologischer Daten	16
3	Material und Methoden	20
3.1	Statistische Software (GNU R)	20
3.2	Datensätze	21
3.2.1	Phänologische Daten	21
3.2.2	Metadaten zu den phänologischen Daten	22
3.2.3	Klimatische Daten	24
3.3	Aufbereitung der Daten	25
3.4	Statistische Methoden	27
3.4.1	Definitionen	27
3.4.2	Statistische Betrachtungen zu den Daten	27
3.4.3	Karten	28
3.4.4	Phänologische Uhr	28
3.4.5	Phänologischer Kalender	29
3.4.6	Häufigkeitsanalyse	31
3.4.7	Zeitreihen und Trendanalyse	33
3.4.8	Klimamaße	34
3.4.9	Korrelationsanalyse	34
4	Ergebnisse	36
4.1	Statistische Übersicht	36
4.2	Ergebnisse der phänologischen Methoden	42
4.3	Entwicklungen in den Zeitreihen	50
4.4	Zusammenhänge zwischen Phänologie und Klima	57

5 Diskussion	63
5.1 Diskussion der Ergebnisse	63
5.2 Fehlerdiskussion	70
5.3 Methodendiskussion	72
6 Ausblick	75
7 Danksagung	77
8 Anhang	78

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Langform
ACF	Autokorrelationsfunktion (engl: <i>Autocorrelationfunction</i>)
DWD	Deutscher Wetterdienst
DOY/doy	Tag im Jahr (engl: <i>day of year</i>)
GLOBE	Global Learning and Observations to Benefit the Environment
GPM	Global Phenological Monitoring
IPG	Internationaler phänologischer Garten
NA	Nicht verfügbarer Wert (engl: <i>Not available</i>)
NAO	Nord-Atlantik-Oszillation
MD	Meteorologischer Dienst der DDR
Med	Median
Mtlw	arithmetischer Mittelwert
Min/Max	kleinste/größte Zahl
QB	Qualitätsbyte
Qu.	Quantil (3rd Qu. entspricht drittem Quantil)
***, **, *, #, ~, n.s.	*** = 0.001, ** = 0.01, * = 0.05, # = 0.1, ~ = 0.3, n.s. = nicht signifikant
RfW	Reichsamt für Wetterdienst
WMO	World Meteorological Organization
ZAMG	Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik

1 Einführung

Das Wort Phänologie stammt aus dem Griechischen und bedeutet in etwa „Lehre von den Erscheinungen“ in der deutschen Sprache. Genauer handelt es sich dabei um biologische Erscheinungen, die man in der Natur beobachten kann. Dabei spielen sowohl Tiere als auch Pflanzen eine Rolle. Im Grunde werden dabei die Eintrittsdaten der Beobachtungen festgehalten und auf verschiedenste Weisen erforscht. Um diese Disziplin wissenschaftlich zu gestalten, wurde die Systematik dahinter von einfachen Beobachtungen über heuristische Formeln bis hin zu komplexen statistischen Analyse immer weiter entwickelt. Die Geschichte der Phänologie reicht nachweislich mindestens bis in das Mittelalter (7. Jahrhundert) zurück, in welchem die ersten Beobachtungen zum Beispiel in Japan im Rahmen des Kirschblütenfestivals getätigt wurden. Vermutlich haben allerdings selbst die Römer, die alten Chinesen und andere Kulturen diese Daten gesammelt. Als wissenschaftliche Disziplin ist die Phänologie seit dem Ende des 19. Jahrhunderts etabliert.

In Deutschland werden heute beim Deutschen Wetterdienst ausschließlich Pflanzen beobachtet. In anderen Netzen werden auch Daten über Vogelzug gesammelt. Das Jahr wird dann zum Beispiel aufgrund der Beobachtungen an den phänologischen Zeigerpflanzen in phänologische Jahreszeiten eingeteilt. Durch einfache heuristische Formeln über Temperatursummen werden die Zeitpunkte für wichtige landwirtschaftliche Tätigkeiten errechnet. Seit Anfang des 20. Jahrhunderts werden darauf aufbauend Karten erstellt, die zeigen sollen, an welchem Ort welche landwirtschaftliche Tätigkeit wann durchgeführt werden soll.

Die moderne auf Empirie basierende Wissenschaft hat die Phänologie ebenfalls für sich entdeckt und leitet aus den reichlich gesammelten Daten immer neues Wissen ab. Alle Änderungen des Standorts einer Pflanze wirken sich auf die Pflanzen und damit auf alle anderen Lebewesen aus. Daraus abgeleitet muss eine Änderung in den Erscheinungen der Pflanzen ursächlich durch eine Änderung des Standorts begründet sein. Als wichtige Faktoren des Standorts die auf Pflanzen wirken muss man die Atmosphäre nennen. Daher wird seit einigen Generationen der Zusammenhang zwischen dem Klima(wandel) und den Erscheinungen der Natur in der Phänologie untersucht.

Hierbei spielen moderne statistische Ansätze wie Bayes'sche Statistik und stochastische Analysen eine immer größere Rolle, da man immer mehr erkennt, dass diese Erscheinungen zu einem gewissen Teil auf zufälligen, durch chaotische Ereignisse hervorgerufenen Effekten beruhen.

In dieser Arbeit sollen die Zusammenhänge zwischen Klima und Phänologie in Hohenheim beleuchtet werden. In Hohenheim befinden sich die klimatische Station und die phänologische Station weniger als einen Kilometer voneinander entfernt und damit in ähnlicher Lage. Außerdem sind sowohl die phänologischen, als auch die klimatischen

Zeitreihen über einen Zeitraum von fast 60 Jahren zu sehr großen Teilen vorhanden. Selbst die Zeitreihen klimatischer Parameter wie der Sonneneinstrahlung weisen kaum Lücken auf. Es sind also sehr gute Bedingungen gegeben, um auch einen grundlegenden Blick auf die Zusammenhänge zwischen Klima und Phänologie zu werfen.

2 Stand der Wissenschaft

2.1 Zeitliche Entwicklung der Phänologie und Wissensstand

2.1.1 Geschichtlicher Abriss

Phänologische Daten (i.w.S) werden schon seit sehr langer Zeit ermittelt und für verschiedene Zwecke verwendet. Sie sind dabei eine einfach zu ermittelnde Quelle für Erscheinungen in der Natur, von welchen die menschliche Prosperation schon von jeher abhängig ist. Erste schriftliche Notationen liegen in den langen Zeitreihe zum japanischen Kirschblütenfestival vor. Diese wurde in den Jahren von 705 n. Chr. bis 1864 n. Chr. erfasst (LAUSCHER, 1978; SEKIGUCHI, 1969).

Im Jahre 1736 startete Robert Marsham in Stratton, England auf seinem Besitz phänologische Beobachtungen, die modereren Richtlinien genügten. Diese Tätigkeit setzte sich in einer Familientradition fort, die bis 1925 anhielt und im Nachhinein bis 1947 rekonstruiert werden konnte (LAUSCHER, 1978; SPARKS U. CAREY, 1995).

Die Phänologie kam im wissenschaftlichen Stil um 1750 in Schweden auf und wurde von Carl von Linné maßgeblich beeinflusst; seine Arbeiten in diesem Bereich hielten allerdings nur bis 1752 an. Auch die wissenschaftlichen Arbeiten der ↑ Societas Meteorologica Palatina hielten aufgrund der politischen Situation und des Todes der Gründer nur von 1781 bis 1792 an (WITTERSTEIN, 1971).

Im Jahre 1808 wurde in Genf die Beobachtung der Blattentfaltung der Rosskastanie begonnen und konnte bis heute fortgesetzt werden. Dabei handelt es sich um die wohl belastbarste langjährige Reihe. In ihr sind aufgrund der Stadtentwicklung Genfs und des Klimawandels verschiedene Faktoren enthalten, die sich überlagern (METEOSCHWEIZ).

Das Wort „Phänologie“ wurde erst im Jahre 1850 durch Charles Jacques Édouard Morren der Fachwelt vorgeschlagen. In den folgenden Jahren wurde der Phänologie allerdings noch keine besonders große Beachtung geschenkt. Erst Hermann Hoffmann und Egon Ihne erarbeiteten eine breite Grundlage für die wissenschaftliche (Pflanzen-) Phänologie, die auch heute noch angewendet wird (WITTERSTEIN, 1971). Egon Ihne veröffentlichte von 1883 bis 1941 die „phänologischen Mitteilungen“. Außerdem erkannte er die Wichtigkeit der Phänologie für die Landwirtschaft und veröffentlichte Karten mit den Zeitpunkten für landwirtschaftliche Tätigkeiten (IHNE, 1910).

Viele wissenschaftliche Diskussionen schufen weiteres Bewusstsein für die Notwendigkeit der Phänologie als etablierte Wissenschaft und so wurden in Deutschland in der Biologischen Reichsanstalt mehr als 1000 Beobachter von 1922 bis 1936 organisiert. Ab 1934 wurde im Reichsamt für Wetterdienst (RfW) ein Beobachternetz mit über 5000

Beobachtern durch Fritz Schnelle aufgebaut. Ein Fokus lag in den 1920er Jahren auf der Phänologie im Zusammenhang mit landwirtschaftlichen Tätigkeiten, da diese Zeit durch einen Mangel an Nahrungsmitteln gekennzeichnet war. Außerdem wurde das Beobachternetz von Egon Ihne weiterhin beim RfW organisiert und unterhielt zeitweise 10000 Beobachter (SCHNELLE, 1948A,B). Im RfW wurde eine sehr große Vielfalt an Daten erhoben, die die heutige um einiges übertrifft. Dabei wurden viele Phasen für verschiedene Arten, Kulturpflanzen und Sorten dieser erhoben. Auch wurden Karten für die Eintrittstermine landwirtschaftlicher Phasen erarbeitet und regelmäßig veröffentlicht. Die im zweiten Weltkrieg von Deutschland besetzten Gebiete wurden ebenfalls sofort im RfW bearbeitet und erste phänologische Karten dieser Gebiete wurden noch vor Kriegsende veröffentlicht (BRUNS, 2007).

Nach Kriegsende wurden die phänologischen Arbeiten von den Siegermächten bald (1947) wieder aufgenommen, da diese erkannten, dass eine Nahrungsmittelsicherung dann am besten erfolgen kann. 1950 wurde unter der Leitung von Franz Seifert der Meteorologische Dienst der DDR (MD) gegründet, der zum Höchststand circa 1500 Beobachter organisierte. 1952 wurde der Deutsche Wetterdienst (DWD) unter der Leitung von Fritz Schnelle gegründet, der circa 2500 Beobachter zum Höchststand organisierte. In beiden Diensten spielte die Erhebung tierphänologischer Daten keine Rolle mehr, sie wurde im DWD nicht integriert und im MD bald eingestellt. Ab 1960 war deutschlandweit ein Rückgang der Beobachter zu verzeichnen, sodass zur Wiedervereinigung nur noch 2600 Beobachter für die beiden Netze tätig waren. Anfang 2006 waren sogar nur noch 1360 Beobachter tätig, mit einer weiter abnehmenden Tendenz (BRUNS, 2007).

1953 wurde vom Agrometeorologischen Committee der World Meteorological Organization (WMO) beschlossen, dass ein internationales phänologisches Monitoringprogramm errichtet werden soll, woraufhin 1957 von Fritz Schnelle und Erik Volkert die ersten Internationalen Phänologischen Gärten (IPG) in Waechtersbach und Escherode gegründet wurden. Der erste IPG (IPG 24, Offenbach) lieferte Daten im Jahre 1959. Die Administration wechselte mehrere Male und ist heute bei der Humboldt Universität Berlin angesiedelt. Im Jahre 2010 wurden 89 IPG unterhalten. In allen IPG werden die gleichen Pflanzen beobachtet, die aus dem Muttergarten stammen und vegetativ von den dort stehenden Mutterpflanzen vermehrt werden, um genetische Klone zu erhalten, die in gleicher Weise auf gleiche Umwelteinflüsse reagieren und so miteinander, um genetische Variation bereinigt verglichen werden können. Außerdem wird im GLOBE-Programm (Global Learning and Observations to Benefit the Environment) ein ähnliches Netz zur Umweltbildung junger Menschen durch Lehrer und Wissenschaftler unterhalten (GPM) (IPG; BRUNS, 2007).

2.1.2 Wissenschaftliche Erkenntnisse

Im Laufe der Entwicklung der Phänologie wurden viele wissenschaftliche Erkenntnisse gewonnen. Die gewonnenen Erkenntnisse entstammen Dank der unterschiedlichen Schwerpunkte der Phänologie verschiedenen Bereichen wie Landwirtschaft, Meteorologie und Botanik. So haben die frühen Wissenschaftler im 19. Jahrhundert (NAT, 1939) erkannt, dass eine Zweitblüte bei Bäumen auftreten kann, wenn der Herbst (September

bis November) besonders warm ist. Im Jahr 1940 wurde in Großbritannien erkannt, dass der extrem kalte Winter zu einem späteren Auftreten der Frühlingsphasen und der vergleichsweise warme Frühling zu einem früheren Auftreten der späten Frühlingsphasen führt (NAT, 1941).

Bekannt muss das Wissen um die Temperaturabhängigkeit der phänologischen Phasen wenigstens seit Reaumur (1735) sein (CHUINE U. A., 2003). Dieser veröffentlichte die erste statistische Arbeit über phänologische Daten. Er postulierte, dass die Unterschiede in den Erscheinungsdaten phänologischer Phasen mit den Unterschieden der Tagestemperaturen von einem beliebigen Tag im Jahr bis zum Eintreten der phänologischen Phase erklärt werden können. In IHNE U. HOFFMANN (1884) wurde festgestellt, dass mindestens 10 konsekutive Jahre einer Phase einer Station benötigt werden, um belastbare Statistik aus den Daten abzuleiten. Die aus diesem Gedanken entwickelten „langen Reihen“ von MeteoSchweiz, dem Deutschen Wetterdienst und anderen, liefern zum Beispiel Einsichten in das Klima des 19. Jahrhunderts. Aus der langen Reihe von Liestal in der Schweiz lässt sich ersehen, dass von 1890 bis 1980 ein Trend vorherrscht, der nicht von Null verschieden ist, dann aber hin zu früheren Blühdaten tendiert. Aus der langen Reihe von Genf ist seit den 1880er Jahren ein Trend hin zu einem früheren Blühbeginn festzustellen. Seit den 1980er Jahren hat sich dieser Trend weiter verstärkt. Außerdem ist die Variationsbreite in diesen Intervallen größer geworden. Die Effekte werden in Genf zwischen 1890 und 1980 auf die Stadtentwicklung und seit 1980 zusätzlich auf den Klimawandel zurückgeführt und in Liestal seit 1980 lediglich auf den Klimawandel (METEOSCHWEIZ).

Dies deutet an, dass es einen Gradienten geben muss der von der Stadt zum Umland hin wirkt. So wurde in HENNIGES U. CHMIELEWSKI (2006) dargestellt, dass diese Gradienten im Vergleich von Berlin und Brandenburg durchaus bestehen, die Stärke der Trends sich aber von Phase zu Phase unterscheidet. Generell kann gesagt werden, dass die beobachteten phänologischen Phasen alle in Berlin früher auftreten, die Rosskastanie (Beginn des Knospenaufbruchs, der Blattentfaltung und der Blüte) und der Gemeine Flieder (Beginn der Blüte) dabei eine große Differenz zwischen den beiden Standorten aufweisen, der Beginn der Apfelblüte von diesen Gradienten allerdings kaum beeinflusst wird. Auch konnte festgestellt werden, dass die Variationsbreite nicht von diesem Gradienten, sondern vielmehr von der beobachteten Art abhängt und mikroklimatische Einflüsse die phänologischen Daten von Städten verzerren können.

Viele Arbeiten, wie die von BISSOLLI U. A. (2005) zeigen, dass die Änderungen der phänologischen Phasen maßgeblich von den Änderungen der Temperatur abhängig sind, allerdings auch durch den Niederschlag beeinflusst werden. Da die Ausprägung der Landschaft die Ausprägung dieser Faktoren an einem Standort zu einem großen Teil beeinflusst, sind Karten möglich, die die räumliche Ausdehnung der Qualitätslevel der phänologischen Phasen darstellen. In HENSE U. MÜLLER (2007) wird allerdings angenommen, dass die Prozesse in der Natur aufgrund eines zufälligen Charakters eher mit einer probabilistischen Sichtweise beschrieben werden sollten. Damit sind immer Variationen in phänologischen Daten enthalten, die mit heutiger Statistik nur unzureichend erklärt werden können. Die Jahr-zu-Jahr-Variabilität ist beispielsweise hoch und folgt keinen heute bekannten deterministischen Regeln.

Von BISSOLLI U. A. (2005) wird außerdem untersucht ob sich die in Deutschland vorzufindenden Trends hin zu früheren Frühlingsphasen auch in der Slowakei finden lassen. Hier konnte festgestellt werden, dass in der Slowakei einige der untersuchten Frühlingsphasen keinen signifikanten Trend oder gar einen Trend hin zu späteren Frühlingsphasen aufweisen. MENZEL U. A. (2006) haben dann 125.000 Beobachtungen von 542 Pflanzen- und 19 Tierarten aus 21 europäischen Ländern zusammengetragen und ausgewertet. Es hat sich herausgestellt, dass 78 % aller Frühlingsphasen verfrüht sind, wovon 30 % statistisch signifikant sind. Nur 3 % haben sich signifikant verspätet. Es konnte außerdem gezeigt werden, dass diese Beobachtungen mit einem Wert des Korrelationskoeffizienten von $-0,69$ mit den Temperaturwerten 19 europäischer Länder korrelieren.

AHAS U. A. (2002) und BISSOLLI U. A. (2005) stellen dar, dass eine Verfrüfung der phänologischen Phasen in West- und Mitteleuropa stattfindet und eine Verspätung in Osteuropa, MENZEL U. A. (2001) quantifizieren dies so, dass in Deutschland ein Trend der frühen und frühesten Phasen von $-0,18$ bis $-0,23$ Tagen pro Jahr und der späteren Frühlingsphasen von $-0,08$ bis $-0,16$ Tagen pro Jahr vorliegt. Diese Verfrüfung wird in Zusammenhang mit der Nord-Atlantik-Oszillation (NAO) gebracht, die warme Luftmassen mit sich führt und damit das Großklima im westlichen und mittleren Europa erwärmt (MENZEL, 2003; MENZEL U. A., 2005).

Diese rein statistischen Auswertungen der Daten werden durch Arbeiten ergänzt, die sich spezifisch mit einem oder mehreren Einflussfaktoren beschäftigen und versuchen einen physiologischen Hintergrund zu gewährleisten. So wird beispielsweise angenommen, dass die effektive Sonnenscheindauer ein ebenso wichtiger Faktor für die Entwicklung von Pflanzen ist wie die Temperatur. Die Temperatur determiniert demnach lediglich die Ablaufgeschwindigkeit chemischer Prozesse, die Sonnenscheindauer ist aber ausschlaggebend für die Produktion und damit auch die Akkumulation signalgebender Stoffe. WREN (1901) postuliert, dass die pflanzenfeindlichen Bedingungen der britischen Inseln mit der hohen Bewölkung erklärt werden können, die wenig effektive Sonnenstrahlung auf dem Erdboden ankommen lässt. Das Postulat von MACDOWALL (1934) scheint plausibel, dass die Sonnenfleckaktivität mit variierender Sonnenstrahlintensität einen Einfluss auf die Phänologie haben muss. In MCMASTER U. WILHELM (1998) wurde bestätigt, dass die Bodentemperatur zwar einen höheren Einfluss als die Lufttemperatur auf die frühen Weizenphasen hat, die späteren Phasen allerdings stärker durch die Lufttemperatur beeinflusst werden. REPOA U. A. (2004) konnten zeigen, dass Bodentemperaturen von 9 °C , 13 °C , 18 °C und 21 °C keinen unterschiedlichen Einfluss auf den Beginn des Austriebs einer vier Jahre alten *Picea abies L.* haben.

Mit der Weiterentwicklung der modernen Statistik wurden Wissenschaftlern mehr und mehr Werkzeuge an die Hand gegeben, die (langen) Reihen phänologischer Daten zu untersuchen. So wurde von DOSE U. MENZEL (2004) eine Methode entwickelt, die die Bayes'sche Theorie verwendet um den Punkt in phänologischen Datenreihen zu finden, der als Wendepunkt für einen veränderten Trend angesehen wird. Hiermit kann auf Ursachen für sich verändernde Trends in den Datenreihen geschlossen werden. Die Anwendung immer neuer Modelle mit unterschiedlichen Einflussfaktoren auf die Daten wurden verwendet um Zusammenhänge zu untersuchen oder Prognosen zu verfeinern. In CHUINE U. A. (2003) wird ein historischer Abriss über Modelle dargestellt, die zur

Erklärung phänologischer Daten angewendet wurden und werden.

2.1.3 Aktuelle Fragestellungen

Einen großen Forschungs- und Diskussionsbedarf beinhalten Modellierungen im phänologischen Bereich. Den bisher angewendeten phänologischen Modellen fehlen erklärende Faktoren. Dabei ist es leicht vorstellbar, dass Faktoren, die heute als dominierende Faktoren gelten (Temperatur), deswegen beobachtet und mit den phänologischen Daten korreliert werden, weil sie einfach beobachtbar waren und sind. Dabei wird aber unterschlagen, dass diese unter Umständen nur aufgrund einer hohen Korrelation mit anderen Faktoren (effektive Sonneneinstrahlung, hohe CO_2 -Werte, et cetera) so viel Gewicht haben und sie deshalb die physiologischen Zusammenhänge nicht zutreffend im Modell repräsentieren. LINKOSALO U. A. (2000) konnten beispielsweise zeigen, dass „chilling-triggered“-Modelle - also solche, die die Eintrittsdaten phänologischer Phasen lediglich in Abhängigkeit von Temperatursummen beschreiben - die Eintrittsdaten einiger *Betula*-Arten nördlicher Regionen schlechter beschreiben als „light-climate-triggered“-Modelle, in welchen ein zusätzlicher Faktor in das Modell aufgenommen wird. Dieser Faktor wirkt als zusätzliches Signal, dass die Pflanze erst dann in die vegetative Phase übertreten lässt, wenn ein Schwellenwert überschritten wird. Dieses Signal kann als lichtvermitteltes Signal angesehen werden, dass an einem bestimmten Standort immer zur selben Zeit in verschiedenen Jahren auftritt (zum Beispiel die Tageslänge). Allerdings wird eingeräumt, dass dieser Faktor auch in der Änderung der Tagesvarianz der Temperatur begründet liegen könnte und weitere Untersuchungen getätigt werden müssen um diese empirischen Untersuchungen zu verifizieren. In LINKOSALO U. A. (2006) konnte allerdings erneut gezeigt werden, dass die gängigen Modelle unzureichend sind. Es wurden neue Modelle angewandt, die Faktoren enthalten, die die für den Eintritt einer phänologischen Phase notwendige Temperatursumme nicht nur akkumulieren lassen, sondern auch, in Abhängigkeit niedriger Temperaturen, verringern. Diese Modelle erklären die verwendeten phänologischen Daten besser, als die traditionellen „chilling-forcing“-Modelle. Daraus wird gefolgert, dass die physiologischen Effekte in den Modellen nicht ausreichend repräsentiert sind. Dies wird auf mangelndes Wissen um die physiologischen Effekte, die zu den verschiedenen Phasen führen, zurückgeführt. Wichtig sind diese Modelle in den Bereichen, in welchen der Klimawandel wirtschaftliche Folgen hat. Hier ist man interessiert zu wissen, wie sich diese Folgen gestalten, so beispielsweise die Forstwirtschaft wissen will, welche Baumarten für die Zukunft am besten geeignet sind.

Da die phänologischen Daten so stark mit den klimatischen Daten korrelieren, ist die Phänologie zu einem der wichtigsten Werkzeuge der Klimawandel-Folgeforschung geworden. Aus langen Reihen kann nach wie vor Wissen über die klimatische Entwicklung vergangener Jahrzehnte und Jahrhunderte abgeleitet werden. Dieses Wissen lässt sich auch auf aktuelle Entwicklungen in der Atmosphäre anwenden. Auch aus wissenschaftlicher Sicht ist es interessant zu wissen, in welchem Maße sich die Entwicklung der Vegetation mit der Klimaveränderung verändert und ob aufgrund von veränderten Konkurrenzsituationen (räumliche) Verschiebungen der Vegetation stattfinden.

Heute spielen phänologische Karten eine größere Rolle denn je, da sich alle phäno-

logischen Phasen im Wandel befinden und die Landwirtschaft zuverlässige Werkzeuge braucht um das Feld weiterhin so zu bewirtschaften, dass eine Nahrungsmittelsicherheit gewährleistet ist. Auch Kleingärtner und private Gärtner profitieren von phänologischen Kalendern und Karten für ihre Region. Für Pollenallergiker sind Pollenfluginformationen wichtig, teils überlebenswichtig. Auch hier spielt die Phänologie eine wichtige Rolle, wenn vorherberechnet wird, wann der Pollenflug am stärksten sein wird.

Da sich phänologische Forschung bisher größtenteils in den gemäßigten Breiten von Europa und den USA abgespielt hat, wird es in Zukunft aufgrund des Klimawandels und der Nahrungsmittelsicherheit immer wichtiger werden, dass ordentliche phänologische Forschung auch in den anderen Biomen (wie den Subtropen/Tropen oder der Tundra/Taiga) durchgeführt wird. Aufgrund der größeren Extreme in den Umwelteinflüssen könnten hier Forschungen an den Faktoren für Modelle getätigt werden, da von Natur aus bestimmte Faktoren deaktiviert oder einfach nur auf eine andere Weise ausgeprägt sind als bei uns in den gemäßigten Breiten.

2.1.4 Fragestellung dieser Arbeit

Da für diese Arbeit sehr viele und recht vollständige Datensätze vorliegen, können weit mehr Fragestellungen bearbeitet werden, als der Umfang einer Diplomarbeit zulassen würde. Die folgenden Punkte sollen bearbeitet werden:

- Wie haben sich die phänologischen Erscheinungen in Hohenheim entwickelt?
 - > Es sollen Funktionen im Statistikprogramm GNU R entwickelt werden, die die phänologischen Schaubilder (phänologische Uhr, phänologischer Kalender) darstellen.
 - > Es sollen Funktionen im Statistikprogramm GNU R entwickelt oder angewendet werden, die weitere Graphen (Häufigkeitsanalyse, Zeitreihe, Q-Q-Plot, Korrelationsschaubilder) darstellen.
 - > Der Vergleich der Zeiträume 1951 bis 1980 und 1981 bis 2008 soll Einblick in die Veränderungen der Phänologie geben.
- Wie wirken sich unterschiedliche klimatische Faktoren auf verschiedene Pflanzen aus?
 - > Die phänologischen Phasen sollen mit den klimatischen Faktoren korreliert werden. Dabei sollen erst einmal nur einfach lineare Regressionen betrachtet werden, die R-Funktionen sollen aber so entworfen werden, dass die Aufnahme weiterer Modelle zur Korrelationsbildung möglich ist.
 - > Es sollen verschiedene Klimamaße berechnet werden, mit welchen die phänologischen Daten korreliert werden können.
 - > Für jede phänologische Phase soll eine Korrelationstabelle berechnet werden, in welcher alle Klimamaße aller klimatischen Faktoren mit der einen phänologischen Phase korreliert werden.
 - > Der Vergleich der Zeiträume 1951 bis 1980 und 1981 bis 2008 soll zeigen, ob die klimatischen Faktoren einen statischen oder einen dynamischen Effekt auf die Pflanzen haben. Hierzu soll die Korrelationstabelle für die beiden Zeiträume berechnet und diese dann voneinander abgezogen werden. Ergeben sich Werte die nicht 0 sind, liegen vermutlich Änderungen im Einfluss der einzelnen Klimafaktoren auf die Pflanzen über die Zeit vor.

2.2 Methoden und Werkzeuge der Phänologie

2.2.1 Sammlung phänologischer Daten

Die Internetseite des Deutschen Wetterdienstes (www.dwd.de) bietet einen Überblick über die phänologischen Beobachtungsnetze, die heute vom DWD durchgeführt werden. Dabei handelt es sich um das Grundnetz und das Sofortmeldernetz.

Im Grundnetz werden an circa 1300 aktiven phänologischen Stationen verschiedene phänologische Phasen beobachtet. Dabei werden bei Wildpflanzen 75 natürlich vorkommende Phasen von 37 verschiedenen Arten ermittelt (Tabelle 8.1, S. 78). Bei Obst, Wein und Kulturpflanzen werden viele Arten und verschiedene Sorten beobachtet. Dabei werden Phasen ermittelt, die Daten zu verschiedenen Entwicklungsstadien enthalten. Die Daten des Grundnetzes werden einmal jährlich an den DWD übermittelt.

Im Sofortmeldernetz werden von circa 400 Beobachtern im Programm „Sofortmeldernetz“ und 37 Beobachtern im Programm „Sofortmeldernetz Reben“ insgesamt 74 Entwicklungsstadien ermittelt. So will man schnellen Zugriff auf die Daten erhalten und den aktuellen Entwicklungsstand abfragen. Die Daten des Sofortmeldernetzes werden deswegen sofort an den DWD übermittelt.

Die Datei 'Stationsliste Grundnetz Jahresmelder' (XLS, 5.93 MB) hält einige Statistiken zu allen seit 1951 existierenden phänologischen Stationen bereit (Abb. 2.1). Hiernach wurden deutschlandweit seit 1951 an 6589 verschiedenen phänologischen Sta-

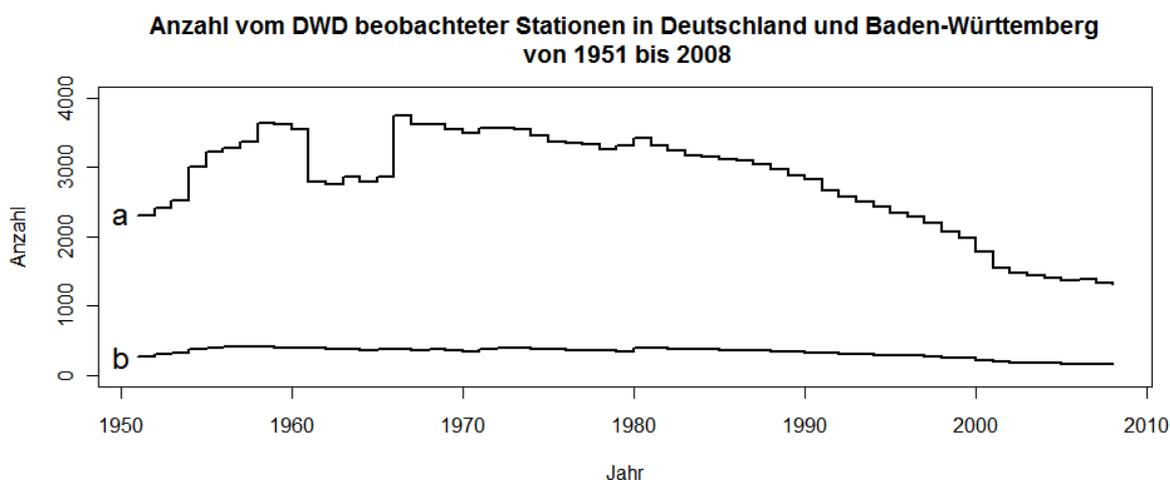


Abb. 2.1: Anzahl vom DWD beobachteter Stationen seit 1951
a = Deutschland, b = Baden-Württemberg

tionen Beobachtungen gemacht. Hiervon waren 2008 nur noch 1312 Stationen besetzt. Mit den Daten der Vorjahre und des Jahres 2009 (1288 besetzte Stationen) verglichen, befindet sich die Anzahl der besetzten Stationen damit seit den 1970er Jahren in einem abnehmenden Trend. 637 Stationen liefern deutschlandweit 50 oder mehr Beobach-

tungsjahre. In Baden-Württemberg wurden seit 1951 an 652 phänologischen Stationen verschiedene phänologische Phasen beobachtet, hiervon waren 2008 noch 149 Stationen besetzt. Baden-Württemberg-weit liefern 93 Stationen 50 oder mehr Beobachtungsjahre. In Abb. 2.2 ist dargestellt, wo sich die phänologischen Stationen in Baden-Württemberg befinden.

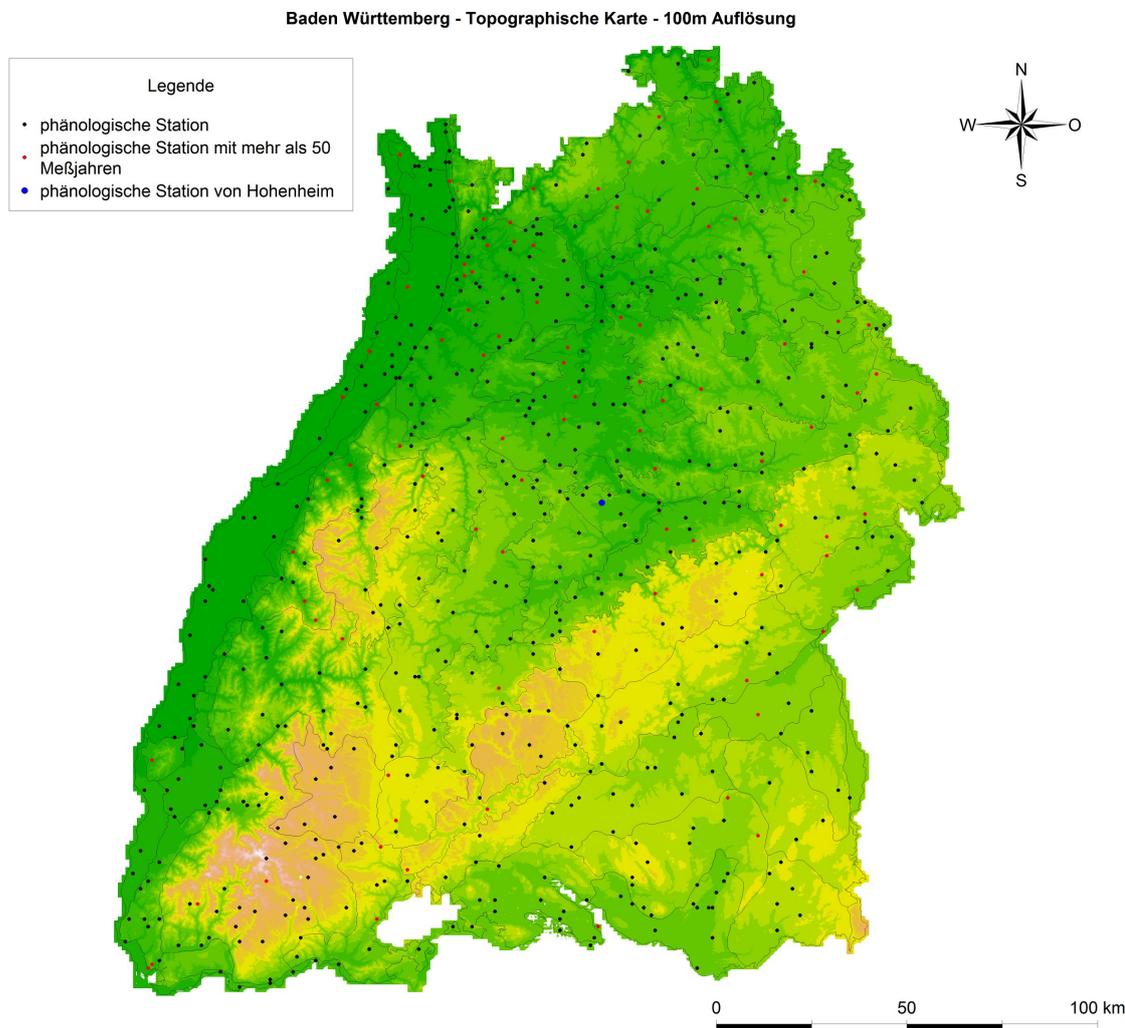


Abb. 2.2: Die vom DWD in Baden-Württemberg beobachteten phänologischen Stationen
 Topographische Karte (100 m Auflösung) mit naturräumlicher Einteilung Baden-Württembergs

In Kapitel 3.2.2 Metadaten zu den phänologischen Daten (S. 22) ist außerdem eine Analyse der aktuellen eigentlichen Daten zu den phänologischen Phasen vorhanden.

Die Beobachtungsrichtlinien werden vom DWD in einer Anleitung, die an alle Beobachter ausgehändigt wird, folgendermaßen charakterisiert (DWD, 1991): An die **Beobachter** werden keine beruflichen Voraussetzungen gestellt. Allerdings sollten Kennt-

nisse über die beobachteten Pflanzen vorliegen. Diese können auch durch das Studieren der Anleitung erworben werden. Außerdem sollten die Beobachter „gewissenhaft, genau und pünktlich“ sein und ihr Beobachtungsgebiet „während der Vegetationsperiode 2-3 mal pro Woche“ begehen. Das **Beobachtungsgebiet** soll für das betreffende Gebiet charakteristisch sein. Die beobachteten Pflanzen sollten frei stehen, sollten nicht im eigenen Garten/der Straße/an Hauswänden/im Wald beobachtet werden, da die Pflanzen dort eventuell nicht den für das Gebiet charakteristischen Umweltfaktoren unterworfen sind. Außerdem sollten die Pflanzen nicht in Mulden, Kältetälern, trockenen Südhängen oder schattigen Nordhängen zu finden sein. Die Höhendistanz sollte nicht mehr als 50 Meter betragen, da sonst ebenfalls nicht gewährleistet ist, dass die Pflanzen den Umweltfaktoren in gleicher Weise ausgesetzt sind. Um exaktere Daten zu erhalten wird das **Beobachtungsobjekt** genauer definiert. So soll eine phänologische Phase und die phänologische Entwicklung über die Jahre hinweg möglichst immer an derselben (gesunden und normal entwickelten) Pflanze beobachtet werden. Damit sollen die Abstände zwischen den Phasen tatsächlich lediglich von den an diesem Standort wirkenden Faktoren bewirkt werden und nicht durch eventuelle Unterschiede im (schwer zu erfassenden) Mikroklima begründet sein. Außerdem können die Phasen so besser von Jahr zu Jahr verglichen werden. Bei annualen Pflanzen sind die obigen Richtlinien nicht anwendbar, daher sollen diese Pflanzen jedes Jahr am Standort des Vorjahres beobachtet werden, um ebenfalls zu gewährleisten, dass Effekte des Mikroklimas weitgehend ausgeschlossen werden können.

Die folgenden 9 Entwicklungsstadien nach DWD (1991) werden auf die in Tab. 8.1 (S. 78) zu findenden Arten (Wildpflanzen) angewandt. Bei keiner der Arten werden alle 9 Entwicklungsstadien beobachtet. Besonders wichtig sind jedoch die Eberesche, die Hänge-Birke und die Rosskastanie, bei diesen werden 5, 5 und 6 Entwicklungsstadien beobachtet.

- Der **Beginn des Austriebs** wird dann beobachtet, wenn an mindestens 3 Stellen des Beobachtungsobjektes (im vorigen Abschnitt genauer definiert) die Knospen aufgebrochen sind.
- Der **Beginn des Maitriebs** wird dann beobachtet, wenn an mindestens 3 Stellen des Beobachtungsobjektes (Fichten, Kiefern) die Knospen aufgebrochen sind.
- Der **Beginn der Nadelentfaltung** wird dann beobachtet, wenn sich an mindestens 3 Stellen des Beobachtungsobjektes (Europäische Lärche) die jungen Nadelbüsche zu spreizen beginnen.
- Der **Beginn der Blattentfaltung** wird dann beobachtet, wenn sich an mindestens 3 Stellen des Beobachtungsobjektes die Blätter vollständig aus der Knospe oder Blattscheide herausgeschoben und ganz entfaltet haben.
- Der **Beginn der Blüte** wird dann beobachtet, wenn sich an mindestens 3 Stellen des Beobachtungsobjektes die männlichen Blüten vollständig geöffnet haben.

- Die **Vollblüte** oder **Allgemeine Blüte** wird dann beobachtet, wenn etwa die Hälfte der vorhandenen männlichen Blüten des Beobachtungsobjektes geöffnet sind.
- Die **ersten reifen Früchte** werden dann beobachtet, wenn an mindestens 3 Stellen des Beobachtungsobjektes die Früchte ihre normale Reife erreicht haben.
- Die **Blatt- oder Nadelverfärbung** wird dann beobachtet, wenn sich etwa die Hälfte der Blätter oder Nadeln des Beobachtungsobjektes herbstlich verfärbt haben.
- Der **Blatt- oder Nadelfall** wird dann beobachtet, wenn etwa die Hälfte der Blätter oder Nadeln des Beobachtungsobjektes abgefallen sind.

2.2.2 Darstellung phänologischer Daten

Bevor die phänologischen Daten dargestellt und analysiert werden können, werden sie beim DWD erst einer Qualitätsanalyse nach HENSE U. MÜLLER (2007) unterzogen. Hierbei werden mit einem geostatistischen Modell auf einem regelmäßigen Gitter Erwartungswerte berechnet und die Daten somit homogenisiert, anschließend um Faktoren für die Höhenlage, geografische Koordinaten und Besiedlungsdichte bereinigt. Bei großer Abweichung des phänologischen Datums vom Erwartungswert kann dann unter der Annahme des Modells davon ausgegangen werden, dass die Qualität des Datums nicht der Qualität der Daten entspricht, die gut zu dem Modell passen.

Will man die Daten nun anschaulich darstellen, haben sich mehrere Werkzeuge bewährt. Eine sehr weit verbreitete Darstellungsform ist die **phänologische Uhr**, sie ist einfach zu verstehen und kann recht variabel eingesetzt werden. Eine Definition dafür kann aus BISSOLLI U. A. (2007) entnommen werden:

„Das wesentliche Merkmal dieser Darstellungsform ist ein ringförmiges Flächendiagramm, in dem der Beginn und die Dauer von 10 phänologisch definierten Jahreszeiten visualisiert werden. Die Definition dieser Jahreszeiten erfolgt über so genannte Zeigerpflanzen, das sind solche Pflanzen, deren Phaseneintritt häufig mit dem Beginn einer bestimmten Jahreszeit assoziiert wird.“

Eine Phase beziehungsweise die phänologische Jahreszeit ist meist mit einer bestimmten landwirtschaftlichen Tätigkeit verbunden (SCHNELLE, 1967). Nach der Blüte des Schneeglöckchens oder der Haselnuss fangen die ersten Arbeiten auf dem Feld an. Die phänologische Uhr kann eingesetzt werden, um einen schnellen Überblick über einen bestimmten Ort zu verschaffen. Allerdings können auch zwei dieser Uhren so kombiniert werden, dass man entweder zwei verschiedene Zeiträume oder zwei verschiedene Orte miteinander vergleichen kann.

Beim **phänologischen Kalender**, wie er ebenfalls in BISSOLLI U. A. (2007) zu finden ist, handelt es sich um ein weiteres Werkzeug, um die Daten verständlich darzustellen. Hierbei werden die Eintrittsdaten der beobachteten Phasen als horizontales Balkendiagramm mit der Abszisse als Tage im Jahr und Ordinate als die verschiedenen Phasen dargestellt. Die unterschiedlichen Eintrittszeitpunkte der Phasen über die Beobachtungsjahre hinweg spannen den Balken auf, diese Balken lassen Rückschlüsse auf die Variabilität der Daten zu. Liefert eine phänologische Uhr lediglich den Mittelwert einer Phase, liefert der Kalender die Information, dass sich diese Phase womöglich über einige Wochen bis hin zu Monaten über die Jahre verteilt. Phasen die der selben phänologischen Jahreszeit zugeordnet werden, haben nahe beieinander liegende Balken.

Neben den Eintrittszeitpunkten für verschiedene Phasen kann in einem phänologischen Kalender auch eine Phase für verschiedene Stationen oder anderweitig zusammengefasst (für eine Region, Höhenparameter einer Ansammlung phänologischer Stationen, et cetera) verglichen werden. So können verschiedene Gradienten veranschaulicht werden.

Ähnlich dem phänologischen Kalender kann die Länge der **Vegetationsperiode** dargestellt werden. Hierbei stellt die Abszisse wieder den Tag im Jahr, die Ordinate allerdings das Jahr dar. Der Balken für jedes Jahr wird dann aus Beginn der Blüte der Saal-Weide und Blattfall der Stiel-Eiche aufgespannt. Dies ist die vom DWD definierte Vegetationsperiode innerhalb derer sich alle wesentlichen vegetativen Prozesse der Pflanzen in Mitteleuropa abspielen. So kann man leicht und schnell die Dauer, den Eintritt und das Ende der Vegetationsperiode vergleichen. Die Vegetationsperiode kann sich auch auf eine einzelne Pflanzenart oder sogar eine einzelne Pflanze beziehen, die phänologische über das Jahr beobachtet wurde. Dann reicht die Vegetationsperiode vom Austreiben der Blätter bis zum Blattfall. Dies kann je nach Fragestellung auf verschiedene Weisen dargestellt werden. Möglich wären Balkendiagramme mit der Dauer der Vegetationsperiode über die Jahreszahl oder einem Graphen mit derselben Belegung der Achsen. Auch wäre es denkbar, jeweils einen Graphen für den Beginn und einen für das Ende der Vegetationsperiode der betrachteten Pflanze in einem Schaubild darzustellen. So wäre nicht nur die Dauer, sondern auch der tatsächliche Eintrittstermin ablesbar.

Etwas komplexer sind Zeitreihen und Häufigkeitsanalysen. Auf den Zeitreihen aufbauend können Trendanalysen durchgeführt werden. BISSOLLI U. A. (2007) stellt diese dar. Zeitreihen sind desweiteren überall dort zu finden, wo eine Variable von der Zeit abhängig ist oder ein solcher Zusammenhang unterstellt wird. Bei der **Zeitreihe** werden die Jahre auf der Abszisse und die Tage seit Jahresbeginn auf der Ordinate abgebildet. Man kann dann für jede phänologische Phase eine Zeitreihe darstellen, indem für jedes Jahr der Wert in das Schaubild eingetragen wird. Die Daten können dabei entweder neutral ohne weitere Informationen eingetragen werden oder in irgend einer Weise gewertet werden. Die Daten können beispielsweise relativ zum Mittelwert dargestellt werden, um zu zeigen, wie sich die Variabilität um den Mittelwert verhält. Daneben kann ein zehnjähriges oder fünfjähriges gleitendes Mittel als zweiter Graph eingetragen werden, um zu zeigen wie sich die Daten in einem größeren Maßstab verhalten.

Eine weitere Möglichkeit die Daten zu bewerten liegt in der **Trendanalyse**. Hierbei wird ein (meist lineares) Modell mit dem Tag seit Jahresbeginn als „Erklärte Variable“ und dem Jahr als „Erklärende Variable“ an die Daten angepasst. Da phänologische Daten meist recht stark schwanken, ist hier jedoch kein besonders großes Bestimmtheitsmaß zu erwarten. Diese linearen Trends können für die gesamten Daten oder verschiedene Zeiträume berechnet werden. Oft wird jeweils ein Trend für vor 1980 (1985) und einer für nach 1980 (1985) berechnet, da hier mit Bayes'scher Statistik ein „Knick“ in den Daten gefunden wurde, der den Trend fast aller Phasen erst statistisch signifikant werden lässt (DOSE U. MENZEL, 2004; SCHLEIP U. A., 2006).

Da die phänologischen Daten einer Zeitreihe stark schwanken und eine Charakterisierung der Verteilung daher über eine Zeitreihe und eine Trendanalyse nur begrenzt möglich ist, werden diese oft mit einer **Häufigkeitsanalyse** charakterisiert. Hierbei werden auf der Abszisse die Prozentwerte aufgetragen, während die Ordinate das Eintrittsdatum, also den Tag im Jahr zeigt. Alle prozentualen Anteile der Daten einer Zeitreihe werden dann kumulativ aufsummiert und jeder Summenschnitt wird in das Schaubild eingetragen. Aus den Summenschnitten kann der Median, der Mittelwert oder andere Werte wie Quantile/Quartile berechnet werden. Diese werden dann mit in das Schaubild eingetragen um die Daten zu charakterisieren.

Zeitreihen können neben diesen einfachen Untersuchungsmethoden einer **Komponentenzerlegung** nach CLEVELAND U. TERPENNING (1992) unterzogen werden. Dabei wird die Zeitreihe in Komponenten zerlegt, die in verschiedener Weise ursächlich auf die beobachteten Pflanzen wirken und die phänologischen Daten determinieren. Nach neueren Ansichten können Zusammenhänge bei Zeitreihen stochastisch angesehen werden, da zufällige Ereignisse eine große Rolle als „Erklärende Variable“ spielen. Bei den Komponenten kann es sich um verschiedene handeln. Oft wird ein Trend, eine Saisonalität und ein Residuum ermittelt. Alle Komponenten ergeben aufsummiert oder aufmultipliziert die eigentlichen Daten. Mit diesem Ansatz ist es einfach auch **gleitende Mittel** zu berechnen.

Die **räumliche Variabilität** phänologischer Daten kann veranschaulicht werden, indem die Eintrittsdaten einer bestimmten Phase auf einer Karte eingetragen und mit unterschiedlichen Farbgradienten hervorgehoben werden. Beim DWD werden für ein Gitternetz von 1 km^2 Auflösung die Werte unter Berücksichtigung der Höhenlage interpoliert. Hier könnten - wie bei der Qualitätskontrolle - auch andere Faktoren, wie die geographischen Koordinaten oder die Besiedlungsdichte in die Interpolation einfließen. Dabei macht es auch Sinn diese Karten nach Naturräumen zu unterscheiden, da in diesen abgrenzbaren Räumen ähnliche Standortfaktoren wirken und die phänologischen Daten so repräsentativ für den Naturraum sein können (SCHNELLE, 1967; BISSOLLI U. A., 2007).

Die phänologischen Daten in der räumlichen Dimension werden auch mit klimatischen Daten in Verbindung gebracht, um landwirtschaftliche Karten zu erstellen, die als Informationsquelle für Landwirte dienen sollen. Hier kann zum Beispiel die Niederschlagssumme zwischen Blüte und Ernte des Winterroggen (Kornausbildung), das Frostrisiko

in der Zeit der Obstblüte oder anderes dargestellt werden. In Verbindung mit der Berechnung von Temperatursummen kann eine Aussage über die frühest mögliche Blüte beobachteter Phasen gemacht und in Karten dargestellt werden (SCHNELLE, 1967).

Da die Temperatur mit der Höhe der Landoberfläche stetig abnimmt (trockenadiabatischer Temperaturgradient: $-0,00981 K/m$) und die Ausprägung einer phänologischen Phase maßgeblich von der Temperatur abhängt, kann man an Hängen einen Gradienten in den phänologischen Daten erkennen. Hierzu wird vom Fernsehmagazin „Planet Wissen“ die 'Aktion - Apfelblütenland' seit 2006 in Kooperation mit dem Landesamt für Umwelt, Messung und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) durchgeführt (LUBW, 2006, 2007, 2010; PLANET-WISSEN, A,B). Es wird ein Höhengradient von 1000 Meter untersucht, wobei auf allen Höhenstufen Apfelbäume gefunden werden können. So ist es möglich die zeitliche Entwicklung der Apfelblüte anhand des Höhengradienten zu untersuchen.

3 Material und Methoden

3.1 Statistische Software (GNU R)

GNU R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2009) ist eine statistische Software, mit welcher sämtliche PC-Routinen dieser Arbeit entworfen wurden. Für die Analyse phänologischer Daten lagen zu dem Zeitpunkt der Diplomarbeit keine anderen Software-Pakete vor, die den Ansprüchen gerecht geworden wären. Die Flexibilität dieser Software liegt darin begründet, dass bei der Berechnung der Mittel der Phasen beispielsweise nicht der Mittelwert benutzt werden muss, sondern stattdessen der Median berechnet werden kann. Dies ist bei anderen, proprietären Software-Paketen nur dann der Fall, wenn es dort implementiert ist. In R kann dies einfach ergänzt oder selbst programmiert werden.

Der Code der zugrunde liegenden Methoden dient als nützliches Hilfsmittel worin alle Methoden deduktiv nachvollziehbar sind. Zur Gewährleistung der Verständlichkeit dieses Textes soll er aber im Fließtext keine große Rolle spielen. Auf dem beiliegenden Datenträger können alle Funktionen und Daten allerdings von Interessierten und R-Begeisterten eingesehen werden.

In dieser Arbeit wird die Version 2.10.1 (Built: 2009-12-14) unter Windows 7 verwendet. Die verwendeten Libraries sind:

- rgdal (KEITT U. A., 2011)
- maptools (LEWIN-KOH U. BIVAND, 2011)
- multcomp (HOTHORN U. A., 2011)
- multcompView (GRAVES U. A., 2011)
- alle anderen in R standardmäßig enthaltenen Libraries.

3.2 Datensätze

Zunächst soll dargestellt werden, welche Daten vorliegen, wie diese formatiert sind und welche Metainformationen dazu vorhanden sind.

3.2.1 Phänologische Daten

Die vorliegenden phänologischen Daten stammen vom Deutschen Wetterdienst (DWD). Bei dem 68806 kB großen Text-Dokument (BW_Phaeno.txt) handelt es sich um eine Tabelle, die 5 Spalten und 2044421 Zeilen enthält.

Die Spalten sind die <Nummer der phänologischen Station>, die <Jahreszahl>, die <Nummer der phänologischen Phase> und der <Tag im Jahr> (doy = day of the year). Außerdem sind die Tag-im-Jahr-Werte durch ein <Qualitätsbyte> quantifiziert, wobei alle Werte anfangs eine 8 erhalten. Dies bedeutet, dass die Daten nicht vollständig geprüft wurden. Eine Prüfung der Daten findet allerdings nur dann statt, wenn Zweifel an der Richtigkeit vorliegen. Dann wird der Wert des Qualitätsbytes je nach Qualität des phänologischen Datums auf einen anderen Wert gesetzt, zum Beispiel auf die 0, wenn das Datum korrekt ist. Die Zeilen der Tabelle sind eine phänologische Phase in einem Jahr und für eine phänologische Station.

In den Daten befinden sich 650 phänologische Stationen, von welchen jede eine charakteristische Nummer hat. Die Jahre zeigen an, in welchem Jahr Daten an der entsprechenden phänologischen Station gesammelt wurden. Jedoch ist nicht für jedes Jahr und jede Station tatsächlich jede phänologische Phase erfasst worden. Diese Lücken kommen dadurch zustande, dass der DWD die phänologischen Daten deutschlandweit mit der Hilfe freiwilliger Naturbeobachter sammelt. Über einen derart langen Zeitraum findet oft ein Wechsel der Beobachter statt oder eine Station ist für eine gewisse Zeit gar nicht besetzt. Außerdem wurden im Verlauf der Jahre immer wieder neue Phasen hinzugefügt und es fand nach der Wiedervereinigung Deutschlands im Jahr 1991 eine große Umstrukturierung in den Datensätzen statt. Für die statistischen Auswertungen ist es daher nötig die fehlenden Stellen mit NA-Werten (Not Available) zu markieren, um eine vollständige Aneinanderreihung der Zeitschritte zu erhalten.

Bei den Werten der Phasen handelt es sich meistens um die Bezeichnung zu einer phänologischen Phase. Allerdings stehen einige der Werte für einen Parameter, der bei der Erhebung der Tag-im-Jahr-Werte einer bestimmten Pflanze von Interesse war. Wird beispielsweise an einer Station ein phänologischer Wert für das erste Blühen der Weinrebe (Kennziffer 272, phänologisches Datum, beispielsweise 60) erhoben, so muss für diese Weinrebe auch angegeben werden um welche Sorte es sich handelt (Kennziffer 271, Sortenkennung, bsplw. 1 für Müller-Thurgau), auf welcher Höhe sich die Parzelle der Erhebung befindet (Kennziffer 285, Höhenlage in Meter über NN, beispielsweise 450) oder welche Leseart, Hangrichtung und Hangneigung die Parzelle aufweist (Kennziffer 286, der Wert setzt sich hier aus drei einstelligen Zahlen zusammen, wobei jede Zahl für einen der Faktoren steht, beispielsweise 153 für Hauptlese, Südrichtung, mäßig geneigt 10-14°). Somit ist auch ein Wert höher als 366 bei den Tag-im-Jahr-Werten erklärbar, da es sich nicht bei allen Werten tatsächlich um die Werte für den Tag im Jahr handelt.

Tab. 3.1: Zusammenfassung über die phänologischen Daten

DOY = Tag im Jahr (day of year), QB = Qualitätsbyte

	Min.	1st Qu.	Med.	Mtlw.	3rd Qu.	Max.
Station	81110000	81431290	82361500	82640095	83421191	84471500
Jahr	1951	1966	1978	1978	1989	2008
Phase	1.0	44.0	94.0	103.7	160.0	324.0
DOY	1.0	115.0	145.0	163.8	214.0	450.0
QB	0.000	8.000	8.000	7.976	8.000	8.000

Der Qualitätsbyte zeigt vorwiegend die Nummer 8, sowohl der Median als auch das erste Quantil betragen 8. Die Verteilung dieser Werte wird in der folgenden Tabelle genauer dargestellt.

Tab. 3.2: Anteil der Qualitätsbytes in den phänologischen Daten

QB = Qualitätsbyte

Anteil [%]	QB	Beschreibung
0.018	0	geprüft und korrekt
0.674	1 - 5	geprüft und zweifelhaft aber nicht korrigiert
0.128	6 - 7	geprüft und falsch aber nicht korrigiert
99.180	8 - 9	nicht vollständig geprüft

Wie bereits erwähnt, wird ein Datum nur dann geprüft, falls Zweifel an der Richtigkeit bestehen. Damit wird auch angenommen, dass ein Wert so lange richtig ist, wie keine Zweifel aufkommen. Da also 99,18 % der Daten nicht in Frage gestellt wurden, kann man annehmen, dass alle Daten auf demselben Niveau sind und der QB kaum eine gewichtende Funktion hat.

3.2.2 Metadaten zu den phänologischen Daten

Auf der Internetseite des DWD lässt sich eine Übersicht über alle phänologischen Phasen finden. Hieraus wurden die Daten extrahiert (siehe Tabelle 8.3, S. 80), in die Datei Phasen.txt gespeichert und diese so verändert, dass sie in R verwendet werden kann. Dazu wurde für jede dort aufgelistete phänologische Phase ein Eintrag in der Tabelle gemacht, der die Phasenkennziffer, die Pflanzengruppe, die Pflanze, das Entwicklungsstadium und die Phasenkennung enthält. Mit dieser Datei lassen sich einige genauere Aussagen über die erhobenen phänologischen Phasen machen, als das auf der Seite des DWD in Textform zu finden ist. Diese Daten sollen dazu dienen in R-Funktionen nach diesen Phasen selektieren zu können und somit gezielt und automatisiert auf die phänologischen Daten des Datensatzes BW_Phaeno.txt zugreifen zu können (Lookup-Tabelle).

Durch weitere Untersuchungen mit R findet man heraus, dass die Daten insgesamt 87 Pflanzen (Wild-, Kulturpflanzen, Obst, Rebe) enthalten und damit 47 Entwicklungsstadien, aber nur 36 Phasenkennungen charakterisiert werden. Diese Diskrepanz lässt sich damit erklären, dass vom DWD verschiedene Entwicklungsstadien die selbe Phasenkennung erhalten haben („Beginn der Blattentfaltung“ und „Blattentfaltung“). Dabei handelt es sich um Entwicklungsstadien, die bei den verschiedenen Pflanzengruppen unterschiedlich bezeichnet sind - und dann von R als unterschiedliche Phasen erkannt werden - aber denselben Sinn haben.

Diese Arbeit bezieht sich ausschließlich auf Wildpflanzen. Dazu Tabelle 8.1 (S. 78). Bei den Wildpflanzen wurden 37 verschiedene Pflanzenarten vom DWD beobachtet, für die 13 verschiedene Entwicklungsstadien unterschieden werden. Auch hier liegen einige Entwicklungsstadien mit ähnlicher/selber Bedeutung doppelt vor, es gibt nur 9 Phasen-kennungen (Tabelle 8.3, S. 80).

3.2.3 Klimatische Daten

Die klimatischen Daten wurden von der Uni Hohenheim selbst gesammelt, da die klimatische Station des DWD schon in den 70er Jahren aufgegeben wurde. Die Daten wurden von Diplom-Meteorologin Ingeborg Henning-Müller zur Verfügung gestellt.

Die klimatischen Daten sind in einer Tabelle erfasst (10738.txt), die 11 Spalten und 21915 Zeilen enthält. Dabei sind in den Spalten die klimatischen Faktoren wie minimale, mittlere und maximale Temperatur in 2 Meter über dem Boden, Niederschlag und andere Faktoren erfasst. Die Zeilen sind jeweils ein Tag vom 01.01.1951 bis 30.09.2010.

Tab. 3.3: Zusammenfassung über die (korrigierten) klimatischen Daten

T_1 = maximale Temperatur 2 m über dem Boden [$^{\circ}C$], T_2 = minimale Temperatur 2 m über dem Boden [$^{\circ}C$], T_3 = mittlere Temperatur 2 m über dem Boden [$^{\circ}C$], T_4 = minimale Temperatur 5 cm über dem Boden [$^{\circ}C$], T_5 = mittlere Temperatur in 2 cm Tiefe [$^{\circ}C$], T_6 = mittlere Temperatur in 5 cm Tiefe [$^{\circ}C$], NS = Niederschlag [mm], rH = mittlere relative Luftfeuchtigkeit [%], sonne = Sonnenscheindauer [h], schnee = Schneehöhe [cm]

	Min.	1st Qu.	Med.	Mtlw.	3rd Qu.	Max.	NA
T_1	-15.200	6.700	13.800	13.480	20.200	36.800	-
T_2	-24.900	0.300	5.500	5.201	10.500	21.500	-
T_3	-18.800	3.400	9.430	9.177	15.100	29.800	-
T_4	-27.400	-1.600	3.100	2.927	8.400	21.000	400
T_5	-9.200	2.900	9.400	9.776	16.300	30.400	424
T_6	-8.200	3.000	9.400	9.738	16.100	29.400	1245
NS	0.000	0.000	0.000	1.914	1.800	81.000	-
rH	0.000	68.000	78.000	75.990	85.750	100.000	-
sonne	0.000	0.800	4.100	4.825	8.000	15.100	-
schnee	0.000	0.000	0.000	0.647	0.000	50.000	6

3.3 Aufbereitung der Daten

Zunächst soll die große Ausgangsdatei in kleinere Dateien aufsplittet werden, auf die einfacher zugegriffen werden kann. Hierzu bieten sich die phänologischen Stationen an. Da in den Daten 650 phänologische Stationen enthalten sind, wurde dies in R automatisiert. Hierzu findet sich in der beliegenden Datei 'Uebersicht_ueber_alle_Funktionen.R' der Code.

Die große Datei wurde eingelesen, sortiert und mit einer for-Schleife, die die Nummern der phänologischen Stationen durchgeht, in kleinere Tabellen aufgeteilt, die dann einzeln mit der Stationsnummer als Dateiname gespeichert wurden. Die Tabellen in diesen Dateien sind so formatiert, dass sie wiederum möglichst einfach mit R aufgerufen und weiterverarbeitet werden können.

Viele der Datensätze enthalten nicht alle phänologischen Phasen oder die phänologischen Phasen nicht in allen Jahren zwischen 1951 und 2008. Zur ordentlichen Analyse und Darstellung sollen die Phasen als komplette Zeitreihe vorliegen. Hierzu sollen aus den im vorigen Schritt erstellten Datensätzen für die Stationen Datensätze für Phasen erstellt werden, die lediglich das Jahr und den Tag im Jahr für diese Phase enthalten. Um dies umzusetzen wurde die Funktion `na.add()` (Tabelle ??, S. ??) geschrieben. Der Funktion wird mitgeteilt, für welche phänologische Station, für welche phänologischen Phasen und für welchen Zeitraum man „saubere“ Datensätze erhalten will. Die Funktion durchsucht dann die Jahre für die angegebenen Phasen und fügt dem Datensatz für jede fehlende Jahreszahl die Kombination aus der fehlenden Jahreszahl und einem NA-Wert hinzu. Daraufhin wird der Datensatz so sortiert, dass die Jahreszahlen in der richtigen zeitlichen Reihenfolge vorliegen. Dann wird pro Phase eine Tabelle geschrieben, die die Jahreszahlen und den Tag im Jahr für diese Phase enthält und anschließend in einer Datei gespeichert.

Diese Daten haben weiterhin den Status unkorrigiert, da in den frühen Phasen noch immer Werte enthalten sind, die deutlich im vorigen Jahr liegen. Liegt das Eintrittsdatum am 30. Dezember des Vorjahres, soll der Wert nicht 364 sein, sondern -1. Es sollen sich also alle Werte zum selben Nullniveau beziehen. Um diese Korrektur durchzuführen, kann die Häufigkeitsanalyse herangezogen werden. Hier kann man leicht sehen, ob eine Zeitreihe Werte enthält, die als Ausreißer betrachtet werden können (siehe auch: Kapitel 3.4.6 Häufigkeitsanalyse, S. 31).

Die Bezeichnungen in der Lookup-Tabelle zu den phänologischen Daten enthalten nicht die gewünschten Bezeichnungen und einige Phasenbezeichnungen liegen doppelt vor. Daher wurden diese manuell so korrigiert, dass sie den gewünschten Bezeichnungen entsprechen und nicht einen Term bilden, der zu lang ist, um in Schaubildern verwendet werden zu können. In dieser Arbeit wird die Bezeichnung verwendet, wie sie in Tab. 8.3 (S. 80) einzusehen ist.

Die klimatischen Daten liegen in der Original-Datei lediglich in einem rohen Zustand vor. Da es mit R relativ einfach ist Textdateien zu verarbeiten, liegt es nahe, die vorliegenden Daten so zu formatieren, dass sie in einer für R verständlichen Textdatei vorliegen. Dafür wurde die originale Excel-Datei kopiert und an der Kopie folgende Schritte vorgenommen:

- Alle leeren Zeilen wurden entfernen.
- Alle Werte, die einen nicht verfügbaren Wert anzeigen wurden in NA geändert
- In allen Zellen aller Spalten wurden die Werte', ' und '.' durch den Wert '0' ersetzt.
- Die Kopfzeile wurde so geändert, dass lediglich eine Zelle pro Spalte dafür vorhanden ist. Dies ist nötig, damit R die Kopfzeile automatisch richtig erkennt.
- Die Excel-Datei wurde als *.txt-Datei exportieren.
- In der Textdatei wurden alle Kommata durch Punkte ersetzt.

Tab. 3.4: Arbeitstabelle der klimatischen Daten. In R werden andere Bezeichnungen für die Variablen geführt. Diese sind hier aus Platzgründen nicht aufgeführt. T_1 = maximale Temperatur 2 m über dem Boden [$^{\circ}C$], T_2 = minimale Temperatur 2 m über dem Boden [$^{\circ}C$], T_3 = mittlere Temperatur 2 m über dem Boden [$^{\circ}C$], T_4 = minimale Temperatur 5 cm über dem Boden [$^{\circ}C$], T_5 = mittlere Temperatur in 2 cm Tiefe [$^{\circ}C$], T_6 = mittlere Temperatur in 5 cm Tiefe [$^{\circ}C$], NS = Niederschlag [mm], rH = mittlere relative Luftfeuchtigkeit [%], sonne = Sonnenscheindauer [h], schnee = Schneehöhe [cm]

jahr	monat	tag	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	NS	rH	sonne	schnee
1951	1	1	3.2	-6.9	1.0	-7.5	-0.2	-0.4	0.2	88	0.7	15
1951	1	2	2.4	0.4	1.7	-1.9	-0.2	-0.2	0.3	74	0.0	11
1951	1	3	1.9	-0.8	0.4	-3.4	-0.2	-0.2	0.0	78	0.0	9
1951	1	4	2.8	-2.4	0.4	-7.3	-0.4	-0.3	0.0	72	6.2	9
1951	1	5	9.2	0.2	5.1	-0.6	-0.2	-0.1	0.3	73	2.8	8
1951	1	6	7.2	-0.4	4.0	-4.1	-0.3	-0.2	0.0	62	2.7	5
...												
2008	12	26	1.7	-2.7	-1.08	-4.1	-0.9	0.3	0.0	68.00	7.6	0
2008	12	27	-1.5	-2.5	-2.05	-3.0	-0.7	0.1	0.0	75.25	0.0	0
2008	12	28	0.6	-3.6	-1.83	-6.5	-1.1	0.0	0.0	68.25	7.0	0
2008	12	29	-1.8	-6.3	-4.78	-10.8	-1.9	-0.5	0.0	84.50	2.2	0
2008	12	30	1.4	-6.9	-4.03	-11.0	-2.3	-0.9	0.0	84.75	7.3	0
2008	12	31	-0.1	-6.9	-3.13	-10.1	-1.4	-0.9	0.8	89.00	2.8	0

3.4 Statistische Methoden

Um die Daten auswerten zu können, wurden für diese Arbeit viele der bekannten phänologischen Methoden für GNU R neu entworfen. Zur Darstellung der Daten in verschiedenen Graphen wurde sich an bereits bestehende Konventionen gehalten und versucht bereits bestehenden Schaubilder beispielsweise des Deutschen Wetterdienstes zu imitieren.

3.4.1 Definitionen

Alle statistischen Berechnungen, die sich in der für diese Arbeit entworfenen Funktionen befinden, wurden mit grundlegenden R-Funktionen erstellt, wie sie in BECKER U. A. (1988) definiert wurden. Definitionen zur Berechnung der Quantile lassen sich in HYNDMAN U. FAN (1996) finden.

3.4.2 Statistische Betrachtungen zu den Daten

Mit der Funktion `qual.doy()` kann man berechnen, wie viele Phasen zu einem bestimmten Niveau vorliegen. An vielen Stellen im statistischen Teil ist es von Interesse, für welche Phasen in allen Jahren Beobachtungen getätigt wurden. Neben den fehlenden Jahren kann auch ein Prozentwert angegeben werden, wenn man beispielsweise wissen will, bei wie vielen Phasen weniger als 10 % der Daten fehlen.

Um statistische Aussagen über die Daten machen zu können, müssen erst einmal grundlegende Dinge geklärt werden. Die statistischen Voraussetzungen für eine Zeitreihenkorrelation werden nach SCHÖNWIESE (1983B) geprüft. Das Vorliegen gleicher Stichprobenumfänge der klimatischen und phänologischen Daten ist durch die in R verwendeten Methoden gewährleistet, die nur dann Ergebnisse liefern, wenn angegeben wird, wie mit den Stichproben umgegangen werden soll. Die Unabhängigkeit innerhalb der Stichproben wird mit der Autokorrelationsfunktion geprüft (`acf()`). Die Verteilung der Stichproben wird graphisch mit einem Q-Q-Plot untersucht. Falls nicht die Normalverteilung vorliegen sollte, kann dieses Werkzeug einen Hinweis auf eine andere Verteilung liefern. Statistisch könnte die aus dem Q-Q-Plot hervorgehende Vermutung mit dem χ^2 -Anpassungstest bestätigt (`chisq.test()`) werden. Hier wird allerdings der Shapiro-Wilk-Test (`shapiro.test()`) nach ROYSTON (1995) angewendet, da dieser in R einfach anzuwenden und damit weniger fehleranfällig ist. Mit einem t-Test des Korrelationskoeffizienten könnte getestet werden, ob ein linearer Zusammenhang zwischen klimatischen und phänologischen Daten abgelehnt werden muss, beziehungsweise in welchem Bereich sich der p-Wert des Tests befindet und auf welchem Vertrauensintervall dieser Zusammenhang signifikant definiert ist. In der hier verwendeten Korrelationsanalyse (Kapitel 3.4.9, S. 34) soll allerdings untersucht werden, welches Bestimmtheitsmaß verschiedene (potentiell nicht nur lineare) Modelle, mit den phänologischen Daten als erklärter Variable und den klimatischen Daten als erklärender Variablen, aufweisen.

Für das Verständnis und die Interpretation der Korrelationsanalyse wird mit dem

t-Test für den Korrelationskoeffizienten allerdings untersucht, wie die klimatischen Variablen voneinander abhängen.

3.4.3 Karten

Abb. 2.2 wurde ebenfalls mit R erstellt. Mit den R-Paketten `rgdal` und `maptools` können in R Daten wie in einem GIS-Programm verarbeitet werden. Das Paket `rgdal` ermöglicht es, Matrix-ähnliche Gebilde in ein Pixelraster mit den Informationen der Stelle in der Matrix für die Stelle des Pixels im GIS zu verarbeiten. So können alle möglichen Informationen der Landschaft mit Farbcodes (Höhenkarte, Landnutzungstypen, Biotoptypen, Niederschlag, et cetera) in einer Karte dargestellt werden. Mit `maptools` können neben Text-Dateien sogenannte Shape-Dateien (*.shp) verarbeitet werden, um zum Beispiel Punktelemente (Städte, phänologische Stationen), Linienelemente (Flüsse, Straßen, Grenzen) oder Flächenelemente (Fläche der Naturräume) darzustellen.

3.4.4 Phänologische Uhr

Die phänologische Uhr basiert auf der Darstellung, wie sie vom DWD her bekannt ist. Die R-Funktion für diese Anwendung wurde am Institut für Landschafts- und Pflanzenökologie bereits entworfen und wurde zur Verfügung gestellt. Dabei haben sich allerdings einige Einschränkungen ergeben, die für diese Arbeit verbessert wurden. Der Code wurde für diese Arbeit darum so verändert, dass die Phasenbezeichnungen an fixen Stellen stehen; durch dynamische Stellen ergeben sich aus den neuesten Daten Überschneidungen in der Beschreibung.

Der bereits bestehenden Funktion zur phänologischen Uhr (`phaeno.uhr()`, Tabelle ??, S. ??) muss der Input in einem charakteristischen Format zur Verfügung gestellt werden. Dabei werden die Bezeichnungen unabhängig von den eigentlichen Daten eingegeben. Alle Daten zusammen werden zwar in einer Liste an die Funktion übergeben, die Einträge dieser Liste können allerdings einzeln modifiziert werden. Somit hängt die eigentliche Anwendung der phänologischen Uhr vom Ursprung der Daten ab, die individuell in das „Eingabe-Formular“ der Funktion eingegeben werden können.

Um sowohl verschiedene frei wählbare Zeiträume derselben Station (zum Beispiel Hohenheim 1951-1980 mit Hohenheim 1981-2008), gleiche Zeiträume verschiedener Stationen (zum Beispiel Hohenheim 1951-2008 mit Stuttgart-Rohr 1951-2008) als auch verschiedene Zeiträume verschiedener Stationen (zum Beispiel Hohenheim 1951-1980 mit Stuttgart-Rohr 1981-2008) miteinander vergleichen zu können, wurde eine zweite Funktion geschrieben (`daten.phaeno.uhr()`, Tabelle ??, S. ??), die die jeweils dafür notwendigen Daten zusammenträgt und in das Format bringt, das für die Funktion der phänologischen Uhr notwendig ist.

Des weiteren war es von Interesse, welchen Effekt der Mittelwert im Vergleich zum Median aufweist, wenn damit die Vergleichswerte der phänologischen Uhr berechnet werden. Hierzu wurde in die Funktion `daten.phaeno.uhr()` ebenfalls eine Möglichkeit integriert. Bisher wird für die phänologische Uhr lediglich der Mittelwert zur Berechnung

der Vergleichswerte herangezogen. Bei (besonders) schief verteilten Daten gilt der Median allerdings als robusteres Mittel. Mit diesem Werkzeug kann also dargestellt werden, ob sich unterschiedliche Vergleichswerte durch die Wahl der Methode ergeben.

Da sich die Eintrittszeitpunkte der Phasen im ständigen Wandel befinden und es an einer Station vorkommen kann, dass eine Leit- und eine Ersatzphase recht nah beieinander liegen (Spätherbst mit 'Stiel-Eiche - Blattverfärbung' (73) und Winter mit 'Winterweizen - Beginn der Bestellung' (93)) ist es ebenso möglich in der Funktion die Leit- und Ersatzphasen zu modifizieren, um negative Werte in der phänologischen Uhr vermeiden zu können.

3.4.5 Phänologischer Kalender

Im Mitteleuropäischen Raum sind die **phänologischen Jahreszeiten** zum Beispiel vom DWD definiert worden (DWD, 1991). Allerdings wurden auch in Österreich (ZAMG - Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik) phänologische Jahreszeiten definiert. Allen gemeinsam ist, dass es 10 verschiedene phänologische Jahreszeiten gibt, Unterschiede stellen sich lediglich in den Leit- und Ersatzphasen dar. Im Folgenden die phänologischen Jahreszeiten, wie sie vom DWD (1991) definiert wurden:

Vorfrühling:

- Leitphase: Hasel - Beginn der Blüte
- Ersatzphase: Schneeglöckchen - Beginn der Blüte
- Landwirtschaft und Garten: Sobald der Boden vom Winter abgetrocknet ist, beginnt die Aussaat des Sommergetreides.
- Sonstiges: Blühbeginn der Schwarzerle und der Sal-Weide, Vollblüte des Winter-Jasmin, Austrieb des Bergahorn in den Alpen.

Erstfrühling:

- Leitphase: Forsythie - Beginn der Blüte (1)
- Ersatzphase: Stachelbeere - Beginn der Blattentfaltung (52)
- Landwirtschaft und Garten: Aufgang des Sommergetreides, Blühbeginn Johannisbeere und Stachelbeere, Obstblüte (Kirsche, Pflaume, Birne, Süßkirsche, Schlehe), Blühbeginn des Ahorn, Legen der Kartoffeln, Aussat der Futterrüben.
- Sonstiges: Blattentfaltung der Roßkastanie und Birke, gegen Ende Blattentfaltung der Rotbuche, der Linde und des Ahorns.

Vollfrühling:

- Leitphase: Apfel, frühreifend - Beginn der Blüte (62)
- Ersatzphase: Stiel-Eiche - Beginn der Blattentfaltung (13)
- Landwirtschaft und Garten: Aufgang Kartoffeln und Futterrüben, Schossen des Wintergetreides, Blühbeginn der Himbeere

- Sonstiges: Blühbeginn des Flieders

Frühsommer:

- Leitphase: Schwarzer Holunder - Beginn der Blüte (18)
- Ersatzphase: Robinie - Beginn der Blüte (123)
- Landwirtschaft und Garten: Blühbeginn des Winterroggen, erste Heuernte, Ährenschieben der übrigen Getreidearten.
- Sonstiges: Blühbeginn des Wiesenfuchsschwanz und anderer Gräser.

Hochsommer:

- Leitphase: Sommer-Linde - Beginn der Blüte (64)
- Ersatzphase: Johannisbeere - Beginn der Fruchtreife (100)
- Landwirtschaft und Garten: Blühbeginn der Kartoffel, Getreideernte (Winterraps, Wintergerste, Winterroggen, Hafer).
- Sonstiges: -

Spätsommer:

- Leitphase: Apfel, frühreifend - Fruchtreife (109)
- Ersatzphase: Eberesche - Fruchtreife (178)
- Landwirtschaft und Garten: zweite Heuernte, Fruchtreife der Frühzwetschge.
- Sonstiges: Blühbeginn des Heidekrautes.

Frühherbst:

- Leitphase: Schwarzer Holunder - Fruchtreife (67)
- Ersatzphase: Kornelkirsche - Fruchtreife (222)
- Landwirtschaft und Garten: Birnenernte, gegen Ende Zwetschgenernte.
- Sonstiges: Blühbeginn der Herbstzeitlosen.

Vollherbst:

- Leitphase: Stiel-Eiche - Fruchtreife (72)
- Ersatzphase: Rosskastanie - Fruchtreife (68)
- Landwirtschaft und Garten: Ernte der Spätkartoffeln, Aussaat des Wintergetreides, Apfelernte, Fruchtreife der Quitte.
- Sonstiges: Fruchtreife der Haselnuss, Laubverfärbung aller wildwachsender Bäume, Blattfall der Obstbäume.

Spätherbst:

- Leitphase: Stiel-Eiche - Blattverfärbung (73)
- Ersatzphase: Eberesche - Blattfall (216)

- Landwirtschaft und Garten: Rübenernte, Aufgang des Wintergetreides.
- Sonstiges: Ende der Feldarbeiten bei stärkerem Frost und damit Ende des Spätherbstes

Winter:

- Leitphase: Stiel-Eiche - Blattfall (226)
- Ersatzphase: Apfel, spätreifend - Blattfall (263)
- Landwirtschaft und Garten: -
- Sonstiges: Nadelfall der Europäischen Lärche

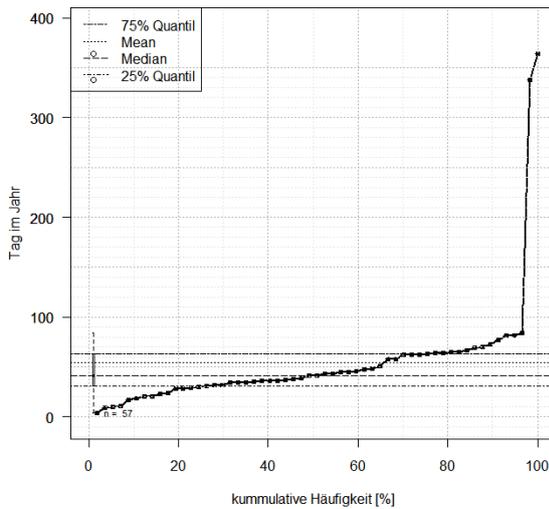
Der phänologische Kalender orientiert sich hier in der Grundaussage an den bereits bestehenden Kalendern. Dabei werden phänologische Phasen in einem horizontalen Balkendiagramm dargestellt. Phänologische Phasen können zu phänologischen Jahreszeiten zusammengefasst werden. Aufgrund der teilweise hohen Variabilität haben diese phänologischen Jahreszeiten keinen fixen Anfangswert und können von Jahr zu Jahr stark abweichen. In dieser Arbeit wurden die Balken in Form von Boxplots dargestellt, um zu zeigen wie die Daten verteilt sind. Außerdem wurde ein Signifikanztest über die Mittelwerte der phänologischen Phasen mit Buchstabendarstellung integriert. Dieser soll anzeigen soll ob zwei Phasen signifikant voneinander verschieden sind (DONAGHUE, 2004; PIEPHO, 2004). So lässt sich überprüfen ob die Leit- und Ersatzphasen das Eintreten der phänologischen Jahreszeiten für die untersuchte phänologische Station stark unterschiedlich anzeigen.

Der Code zum phänologischen Kalender (`phaeno.kalender()`, Tabelle ??, S. ??) ist so gestaltet, dass nicht nur verschiedene phänologische Phasen miteinander verglichen werden können, sondern auch verschiedene phänologische Stationen. Theoretisch wäre es auch denkbar die Funktion weitergehend so zu gestalten, dass verschiedene phänologische Phasen verschiedener phänologischer Stationen miteinander verglichen werden können. Da sich dazu aber bisher keine Notwendigkeit in dieser Arbeit ergeben hat, wurde dies bisher nicht implementiert.

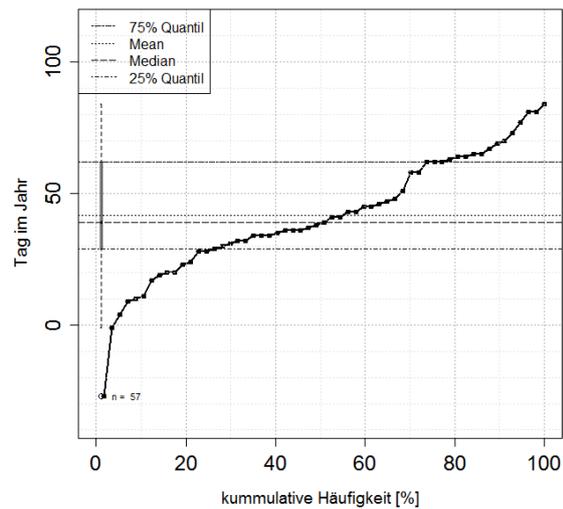
Die Vegetationsperiode kann ebenfalls als Balkendiagramm dargestellt werden. Es macht also Sinn, dieselbe Architektur der Funktion zu verwenden und die Vegetationsperiode in `phaeno.kalender()` zu integrieren. Dabei wird wie beim DWD das Blühen der Sal-Weide als Beginn der Vegetationsperiode und der Blattfall der Stiele-Eiche als Ende der Vegetationsperiode ermittelt. So wird für jedes Jahr die Zeit ermittelt in der die meisten vegetativen Abläufe statt finden.

3.4.6 Häufigkeitsanalyse

Die Häufigkeitsanalyse (`phaeno.häufigkeit()`, Tabelle ??, S. ??) ist an BISSOLLI U. A. (2007) angelehnt und mit der Möglichkeit erweitert, extreme Daten zu korrigieren. Bei der Häufigkeitsanalyse soll ein Überblick über die Verteilung der Daten geliefert werden, um darzustellen in welchem Bereich der Variablen „Tag im Jahr“ sich die meisten



(a) unkorrigierte Häufigkeitsanalyse



(b) korrigierte Häufigkeitsanalyse

Abb. 3.1: 'Hasel - Beginn der Blüte' (1) in Hohenheim in den Jahren 1951 bis 2008. Die unkorrigierte Zeitreihe zeigt zwei Extremwerte, welche zum vorigen Jahr gehören.

Daten befinden. Hierzu werden die Eintrittsdaten der Größe nach sortiert und der prozentuale Anteil eines Schrittes der Zeitreihe einer Phase berechnet. Alle Schritte werden aufaddiert und ergeben die kumulative Häufigkeit. Mit der Abszisse als kumulative Häufigkeit und der Ordinate als Eintrittsdatum ergibt sich ein charakteristisches Schaubild. Je flacher dieses Schaubild ist, desto geringer ist die Varianz der Daten, je steiler, desto höher ist die Varianz. Steile „Stufen“ am Anfang oder Ende des Schaubilds lassen auf Extremwerte oder Ausreißer schließen. Abb. 3.1 (a) zeigt den Graph der unkorrigierten Phase 'Hasel - Beginn der Blüte' (1) für die Jahre 1951 bis 2008. Der Ausreißer macht es unmöglich, die Statistik ordentlich ablesen zu können. Die Funktion gibt diese Statistik als Zahlen aus, die beim Erstellen des Schaubildes in R abgelesen werden können und aus Gründen der Überschaubarkeit nicht in das Schaubild eingebaut werden. Die R-Funktion dient auch der Korrektur der Werte, indem ein oberes Blühdatum angegeben wird, oberhalb dessen alle Werte zum vorigen Jahr gerechnet werden. Hierzu wird die Differenz zum letzten Tag des laufenden Jahres berechnet (also entweder 365 oder 366) und mit einem '-' (Minus) bezeichnet an die Stelle der unkorrigierten Zahl in die Tabelle geschrieben. Um das Schaubild lesbarer zu gestalten, wird die Ordinate auf den Bereich beschränkt, in dem sich tatsächlich Werte der Variable Tag-Im-Jahr befinden. Abb. 3.1 (b) zeigt das Resultat.

3.4.7 Zeitreihen und Trendanalyse

Die einfachste Möglichkeit phänologische Daten darzustellen liegt in der Zeitreihe (`phaeno.zeitreihe()`, Tabelle ??, S. ??). Dabei werden die phänologischen Eintrittsdaten als Tag im Jahr auf der Ordinate und die Beobachtungsjahre auf der Abszisse aufgetragen. So kann man einfach sehen, welchen Wert die phänologischen Daten im Verlauf der Jahre angenommen haben. Eine Jahr-zu-Jahr Varianz kann abgeschätzt werden. Diese ist bei den meisten Phasen über viele Jahre hinweg recht groß.

Bei der Zeitreihe ist es auch ohne viel Statistik schon möglich zu erkennen, ob Muster in den Daten vorhanden sind. Es können zum Beispiel Trends erkannt oder eine Abhängigkeit von klimatischen Faktoren dargestellt werden, indem diese ebenfalls als Zeitreihe mit derselben zeitlichen Auflösung über das Schaubild der phänologischen Daten gelegt werden. Auch Ausreißer können in dieser Darstellung einfach erkannt werden.

Um empirische Aussagen über die phänologischen Daten zu machen, können Zeitreihen zur Trendanalyse herangezogen werden. Dabei wird ein lineares Modell der folgenden Form an die Daten angepasst.

$$y_i = \alpha + \beta x_i + e_i \quad (3.1)$$

wobei

y_i = i-ter Meßwert der Zielvariable,

x_i = i-ter Meßwert der Einflussvariable,

e_i = Abweichung des i-ten Meßwertes der Zielvariable von der Regressionsgerade; normalverteilt mit Mittelwert 0 und Varianz σ^2 .

Das Bestimmtheitsmaß hat hier aufgrund der hohen Jahr-zu-Jahr Variabilität meist keinen sehr großen Wert. Um den Trend oder mehrere Trends in den Daten besser zu verdeutlichen, können mehrere dieser linearen Modelle angepasst werden. Dabei werden meist zwei lineare Modelle an die Daten angepasst, die die Zeit vor und nach 1980 (dem Median der Jahre) oder 1985 beschreiben. Um diesen Zeitraum kann in vielen Datenreihen ein „Knick“ beobachtet werden, bei dem sich der Trend von einem nicht signifikanten in einen signifikanten Trend dreht (DOSE U. MENZEL, 2004; SCHLEIP U. A., 2006). Nimmt man an, dass um die 1980er Jahre tatsächlich ein Knick in der Form stattgefunden hat, dass sich hier ein Trend schlagartig geändert hat, ist es sinnvoll, die beiden dadurch getrennten Zeiträume gesondert zu beobachten. Glücklicherweise teilt dieser Knick die zur Zeit vorliegenden Daten quasi in der Mitte, sodass Vergleiche ein noch höheres Gewicht haben, da sie auf denselben Stichprobenzeitraum angewendet werden können.

Mit einer Komponentenzerlegung wird eine Zeitreihe auf ihre Komponenten hin untersucht. Die wichtigsten Komponenten sind die <Saisonalität>, der <Trend> sowie die <irreguläre Komponente>. Bei der Saisonalität handelt es sich um ein regelmäßig (mit gleichbleibender Frequenz und Amplitude) wiederkehrendes Signal. Dieses wiederkehrende Signal kann durch ein Polynom n -ten Grades geschätzt werden, wobei n die Anzahl der Wiederholungen der Saison ist. Ein Trend ist eine Veränderung in einer Meßreihe und hat eine Grundtendenz. Dabei kann der Trend durch verschiedene Faktoren beein-

flusst sein. Bei der Komponentenzerlegung spielt ein deterministischer Zusammenhang zwischen dem Trend und möglichen erklärenden Faktoren allerdings ersteinmal keine Rolle. Der Trend wird durch ein glätten der Zeitreihe errechnet, nachdem die Saisonalität von der Zeitreihe abgezogen wurde. Dabei wird ein Tiefpassfilter auf die Daten angewandt, welcher hohe Frequenzen unterdrückt und so den tiefen Bereich der Frequenz isoliert (SCHÖNWIESE, 1983A). Der irreguläre Teil der Komponentenzerlegung ergibt sich, wenn der Trend und die Saisonalität von der Zeitreihe abgezogen werden.

3.4.8 Klimamaße

Die phänologischen Daten werden meist im Zusammenhang mit klimatischen Daten untersucht, so auch in dieser Arbeit. Nun sind phänologische Erscheinungen theoretisch durch viele verschiedene Werte erklärbar. Dabei sind Temperatursummen nur eine von vielen Kombinationsmöglichkeiten klimatischer Faktoren, die einen physiologischen Effekt auf Pflanzen haben könnten.

Hier wurden die Funktionen `climate.mean()` und `climate.sum()` entwickelt. `climate.mean()` berechnet klimatische Mittelwerte. Dieser Funktion muss mitgeteilt werden, welche phänologische Station und welcher Zeitraum von Interesse sind. Außerdem wird die klimatische Variable (Tabelle 3.3, S. 24) über einen Parameter angegeben und eine Methode der Mittelung bestimmt. Dabei können die Monatsmittelwerte aller Jahre und die Monatsmittelwerte über alle Jahre angegeben werden. Es wäre auch denkbar, die Funktion so weiterzuentwickeln, dass klimatischen Werte einzelner Tage aller Jahre und über alle Jahre ausgegeben werden. `climate.sum()` berechnet Summen der klimatischen Variablen. Bisher sind die Summen der i Tage (mit $i = 10, 20, 30, 40, 50$ vor Eintreten der phänologischen Phase und die Summe seit dem 01.01, dem 01.02 und dem 01.03 des Jahres definiert. Die Summe über eine bestimmte Anzahl Tage soll zeigen, ob eine größere Summe an Tagen ein höheres R^2 hat, die Summe seit einem bestimmten Tag soll Effekte schon vor dem Beginn der Vegetationsperiode auf die beobachtete Phase wirkt und wo sich dieser eventuell befinden könnte. Nimmt man beispielsweise an, dass die Vegetationsperiode einer Pflanze aufgrund der Blattentfaltung am 01.03. beginnt, eine Summe seit dem 01.02. aber ein größeres R^2 zeigt, muss man erklären, welche Einflüsse schon vor Eintreten der Vegetationsperiode eine Effekt haben. Die Summen werden all vom Tag des tatsächlichen Eintretens bis zum Summenwert berechnet und nicht vom mittleren Eintreten der Phase bis zum Summenwert.

3.4.9 Korrelationsanalyse

Die Idee hinter der Korrelationsanalyse in dieser Arbeit liegt darin, dass jede mögliche Kombination klimatischer Variablen (Modelle) ersteinmal wertfrei von der physiologischen Funktion in der Pflanze statistisch geprüft werden soll. Herausstechende Werte werden dann genauer unter die Lupe genommen und müssen in irgendeiner Weise erklärt werden. Nachdem evaluiert wurde, ob die Korrelation in der Realität durch physiologische Prozesse manifestiert ist, kann sich ein Bild darüber verschafft werden, welche

klimatischen Faktoren mit welcher Gewichtung auf die phänologischen Erscheinungen (zumindest im statistischen Modell) einwirken.

Zur Umsetzung dieses Vorhabens wurde die Funktion `coran()` geschrieben. Die Funktion setzt die Funktionen `phaeno.zeitreihe()`, `climate.mean()` und `climate.sum()` voraus. Letztendlich wird dann eine Abfrage dieser Funktionen mit denselben Parametern durchgeführt. Damit liefern diese Funktionen vergleichbare Daten, die in ein lineares Modell zusammengebracht werden um das Bestimmtheitsmaß (R^2), den p-Wert des `cor.test()`, die Steigung der Regression zu berechnen und ebenfalls das Signifikanzniveau der Korrelation in Sternchen-Notation auszugeben. Das R^2 wird dann als Korrelationsmaß interpretiert, da es die gemeinsame Varianz der klimatische und phänologischen Daten angibt. Der p-Wert zeigt, ob die Korrelation der beiden Variablen von Null unterschiedlich ist. der Wert der Steigung soll zeigen, ob ein positiver oder ein negativer Zusammenhang besteht. Der Output besteht aus einer Liste, die einen Datenvektor des R^2 , einen des p-Wertes, einen der Sternchen-Notation, einen der Signifikanz-Niveaus und einen der Steigung aller berechneten Werte aus einer klimatischen Variablen mit der phänologischen Zeitreihe enthält. Mit einer for-Schleife lässt sich dann automatisiert eine Tabelle erstellen, die alle Werte aller klimatischen Variablen mit der einen phänologischen Zeitreihe korreliert. Hier sei angemerkt, dass sich die Klimamaße im Moment lediglich von Hand erweitern lassen. Die Funktion ist noch nicht in der Lage neu hinzugefügte Klimamaße im Output automatisch einzuordnen. Außerdem wird auf diese Weise sehr viel Output erzeugt, der Stück für Stück durchsucht werden muss. Eine automatisierte Auswertung wäre möglich, indem besonders markante Werte der Analyse extrahiert und als Korrelationsschaubild dargestellt werden.

4 Ergebnisse

4.1 Statistische Übersicht

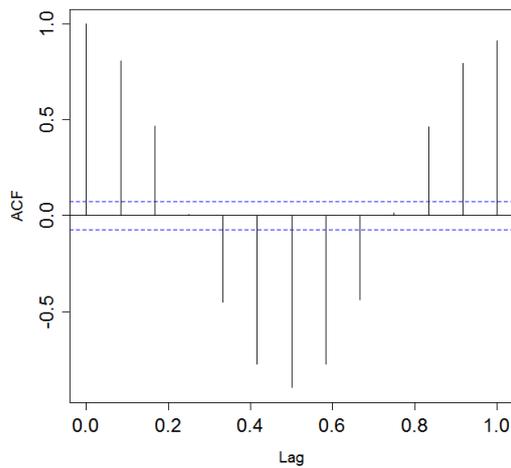
Die phänologischen Daten aller Wildpflanzen enthalten 4350 Tag-im-Jahr Werte, von welchen 1234 Werte nicht verfügbar sind (28.37%). Dabei liegen 15 Phasen vor, die einen verfügbaren Wert für alle 58 Jahre aufweisen (20%):

Schneeglöckchen - Beginn der Blüte (Kennziffer der Phase: 2), Sal-Weide - Beginn der Blüte (4), Rosskastanie - Beginn der Blättentfaltung (7), Rosskastanie - Beginn der Blüte (8), Hänge-Birke - Beginn der Blättentfaltung (9), Schlehe - Beginn der Blüte (11), Flieder - Beginn der Blüte (15), Fichte - Maitrieb (17), Schwarzer Holunder - Beginn der Blüte (18), Wiesen-Fuchsschwanz - Beginn der Vollblüte (19), Rosskastanie - erste reife Früchte (68), Rotbuche - Blattverfärbung (71), Stiel-Eiche - Blattverfärbung (73), Hänge-Birke - Blattverfärbung (74), Löwenzahn - Beginn der Blüte (116).

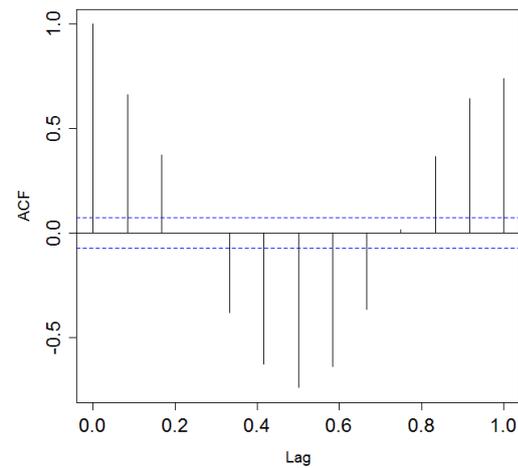
Die Anzahl Phasen mit 1 oder mehr fehlenden Werten ist in Tab. 4.1 dargestellt.

Tab. 4.1: Anzahl fehlender Jahre.

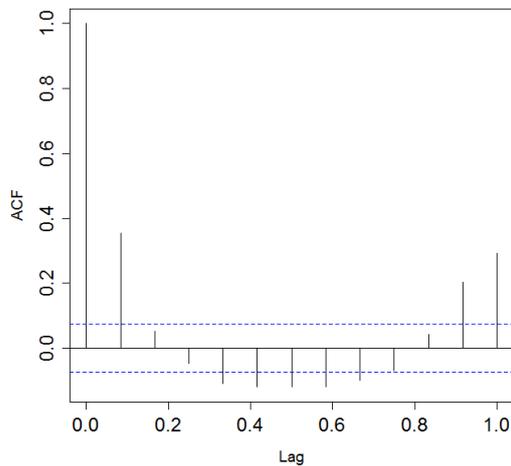
<i>n_{fehlendeJahre}</i>	<i>n_{Phasen} total</i>	<i>n_{Phasen} %</i>
0	15	20
1	9	12
2	0	0
3	9	12
4	0	0
5	3	4
6	0	0
7	0	0
8	0	0
9	0	0
> 10	39	52



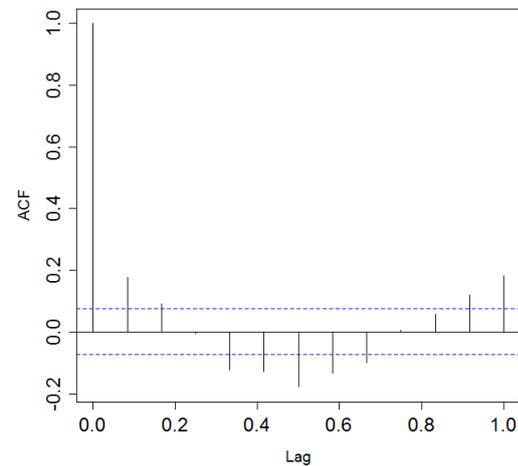
(a) mittlere Temperatur, 2 m über dem Boden



(b) Sonnenscheindauer



(c) Schneehöhe



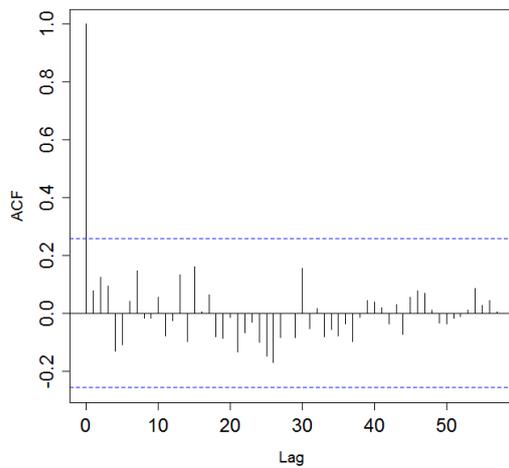
(d) Niederschlag

Abb. 4.1: Autokorrelationsfunktion. Die x-Achse zeigt die Verschiebung (engl. *lag*) der Autokorrealation, die y-Achse zeigt den Wert der Autokorrelation. Die Verschiebung zeigt nicht die Werte von 1 bis 12, da eine Saisonalität in den Daten enthalten ist. So findet sich eine Verschiebung beim Wert 1/12. Die blaue Linie zeigt das 95 % Vertrauensintervall um 0.

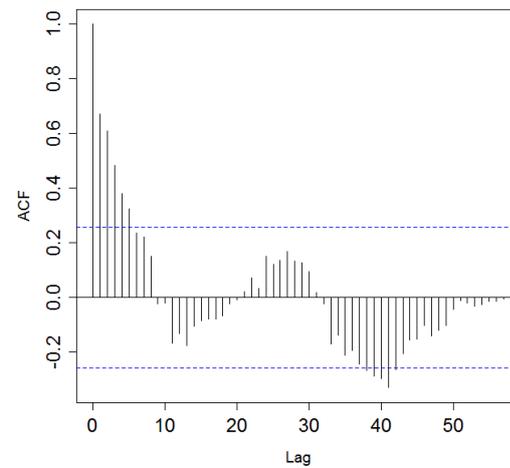
Die Autokorrelationen der Phasen mit keinem oder nur einem oder zwei einzelnen nicht verfügbaren Werten zeigen unterschiedliche Verhaltensweisen für die verschiedenen phänologischen Phasen und klimatischen Variablen.

Die Autokorrelationsfunktionen (ACF) der Monatsmittel der klimatischen Variablen sind von der Saisonalität stark beeinflusst. Die Rotationsachse der Erde ist schräggestellt. Daraus und aus der Umlaufbahn der Erde um die Sonne ergibt es sich, dass die

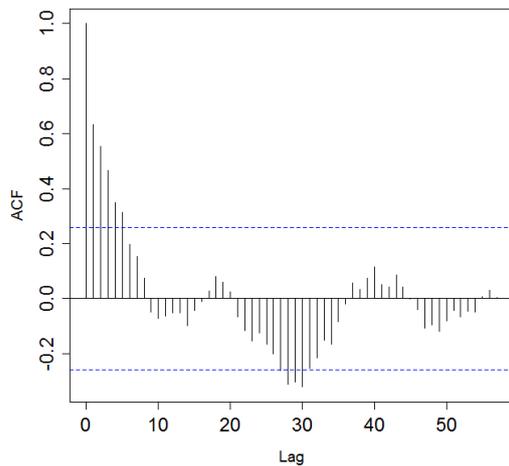
Erde ungleichmäßig von der Sonne bestrahlt wird. In den Wintermonaten trifft sowohl zeitlich weniger Sonnenstrahlung als auch qualitativ schwächere Sonnenstrahlung auf die nördliche Hemisphäre. Daher ist es nicht verwunderlich, dass die größte negative Autokorrelation bei einer Verschiebung von 6 und ein Trend zu und von diesem Wert zu sehen ist. Bei einer Periode von 12 Monaten findet man einen gegensätzlichen Wert der Saisonalität immer bei der Hälfte, also 6 Monaten. Die minimale, mittlere und maximale Tagestemperatur in 2 m über dem Boden und die minimale Temperatur in 5 cm über dem Boden zeigen laut Tab. 8.4 eine Autokorrelation von etwa -0,90 bei der Verschiebung von 6 (hier ist lediglich der Graph der mittleren Tagestemperatur gezeigt, Abb. 4.1 (a)). Auch die Bodentemperaturen in 5 cm und 2 cm Tiefe zeigen einen ähnlichen Wert. Der Graph der Sonnenscheindauer zeigt denselben Trend (Abb. 4.1 (b)), allerdings lediglich eine Autokorrelation von -0,7. Die mittlere relative Luftfeuchtigkeit zeigt eine Autokorrelation von -0,4. Die Schneemenge und der Niederschlag zeigen Autokorrelationen von unter -0,2, wobei bei der Schneemenge die Verschiebungen 1, 11 und 12 doppelt so große Autokorrelationen zeigen, wie beim Niederschlag. Bei Niederschlag wiederum zeigt die Verschiebung 6 eine stärker unterschiedliche Ausprägung als bei der Schneemenge (Abb. 4.1 (c) und (d)).



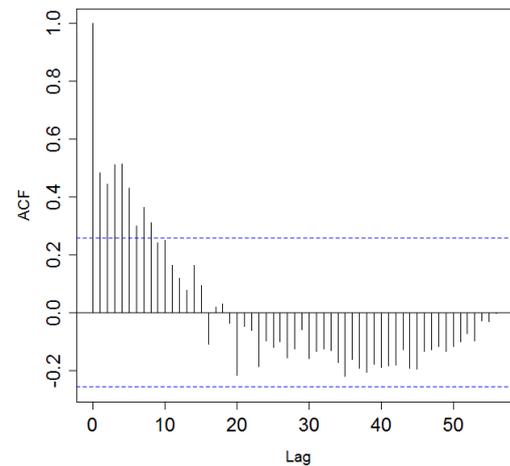
(a) Rotbuche - Blattentfaltung



(b) Stiel-Eiche - erste reife Früchte



(c) Hängebirke - Blattverfärbung



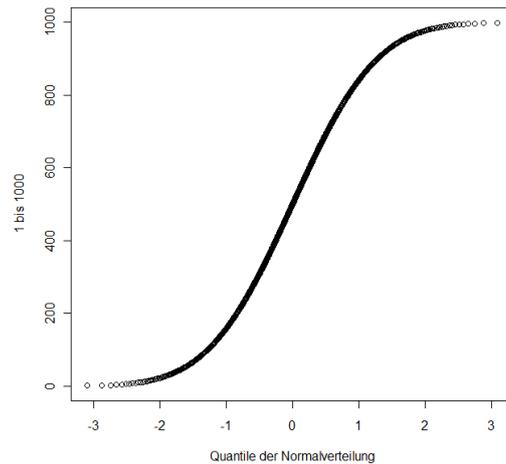
(d) Wiesen-Knäuelgras - Beginn der Vollblüte

Abb. 4.2: Autokorrelationsfunktion phänologischer Phasen. Die x-Achse zeigt die Verschiebung (engl. *lag*) der Autokorrealation, die y-Achse zeigt den Wert der Autokorrelation. Die blaue Linie zeigt das 95 % Vertrauensintervall um 0.

Die Tab. 8.19 und 8.20 zeigen die ACF der phänologischen Phasen. Einige der Phasen zeigen keine signifikanten Autokorrelationen oder fluktuieren unregelmäßig um Null (Abb. 4.2 (a)). Einige dieser Phasen zeigen Trends in den Autokorrelationen, die sich jedoch unter dem Signifikanzniveau bewegen. Die Betrachtung dieser (nicht signifikanten) Trends in der ACF liefert allerdings trotzdem Informationen über Struktur der Zeitreihe. Die ACF der Phase 'Stiel-Eiche - erste reife Früchte' (72) fluktuiert beispielsweise lediglich zwischen drei Werten und strebt gleichmäßig auf diese zu (Abb. 4.2 (b)). Bei

der Phase 'Hängebirke - Blattverfärbung' (74) ist dasselbe zu beobachten, allerdings sind hier fünf Extremwerte gegeben (Abb. 4.2 (c)). Einige Phasen zeigen einen Trend derart, dass sich die Autokorrelation ab einer bestimmten Verschiebung (circa 15-20) ins Negative dreht, sich dort relativ konstant hält und bei den Verschiebungen nach 50 wieder gegen Null tendiert (hier beispielhaft der Graph der Phase 'Wiesen-Knäuelgras - Beginn der Vollblüte' (20), Abb. 4.2 (d)).

Die Korrelationen zwischen den klimatischen Variablen sind in Tabelle 8.7, S. 84 dargestellt.

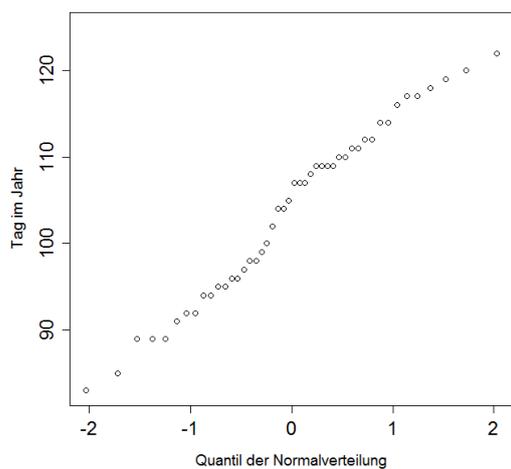


(a) Normalverteilung

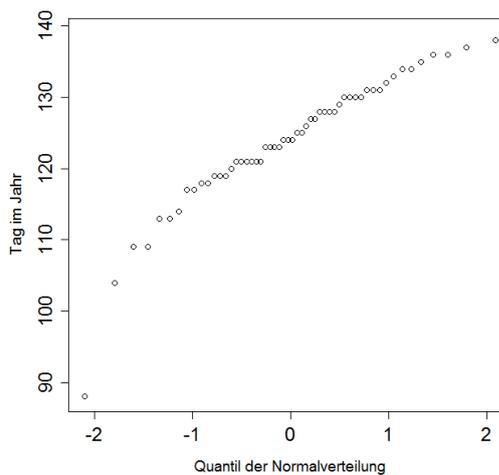
Abb. 4.3: Q-Q-Plot der Normalverteilung. Auf der x-Achse sind die Quantile der Normalverteilung, auf der y-Achse die Werte von 1 bis 1000 abgebildet. Dieses Schaubild dient dem Vergleich mit den anderen Q-Q-Plots.

Die meisten Q-Q-Plots der phänologischen Daten könnten theoretische auf die Normalverteilung hindeuten (Abb. 4.4 (a) und (b)). Aufgrund der geringen Datenmenge ist dies über die Q-Q-Plots nicht ausreichend prüfbar. Der Shapiro-Wilk-Test für die phänologischen Daten (Tabelle 8.5, S. 83) zeigt, dass bei wenigen Phasen signifikante Unterschiede zwischen den Stichprobenverteilungen und der angenommenen Normalverteilung vorliegen. Die Phasen 10, 17, 20, 71, 73, 74, 115, 116, 120 (Abb. 4.4 (c)), 121, 215 und 228 zeigen p-Werte unter dem Signifikanzniveau $\alpha = 0.05$ (Tab. 8.3, S. 80 für die Kennziffern der Phasen).

Die Q-Q-Plots aller klimatischen Variablen zeigen klare Abweichungen von der Normalverteilung. Die Verteilung der Sonnenscheindauer kommt der Normalverteilung noch am ähnlichsten (Abb. 4.5 (a)). Die Verteilung der mittleren Temperatur in 2 m über dem Boden (Abb. 4.5 (b)) weicht aufgrund der großen Datenmenge schon im Q-Q-Plot von der Normalverteilung ab. Auch der Shapiro-Wilk-Test (Tabelle 8.6, S. 84) zeigt eindeutig, dass die Daten nicht der Normalverteilung entstammen. Alle weiteren Schaubilder können auf dem beiliegenden Datenträger eingesehen werden.

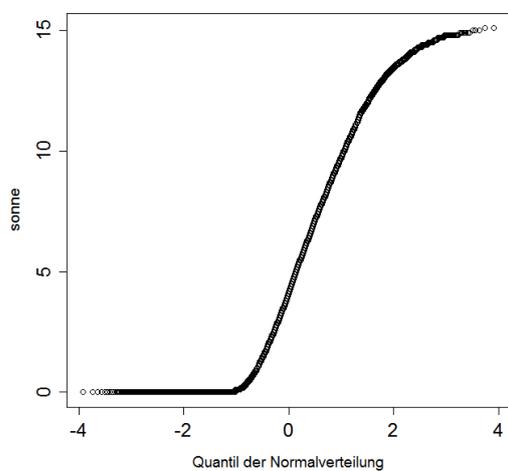


(a) Schwarz-Erle - Blattentfaltung

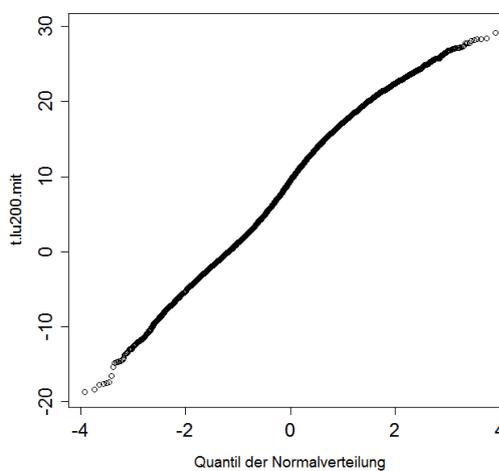


(b) Esche - Beginn der Blattentfaltung

Abb. 4.4: Q-Q-Plots phänologischer Phasen. Auf der x-Achse sind die Quantile der Normalverteilung abgebildet, die y-Achse zeigt die Werte der phänologischen Phase.



(a) Sonnenscheindauer



(b) mittlere Temperatur, 2 m

Abb. 4.5: Q-Q-Plots klimatischer Variablen. Auf der x-Achse sind die Quantile der Normalverteilung abgebildet, die y-Achse zeigt die Werte der klimatischen Variable.

4.2 Ergebnisse der phänologischen Methoden

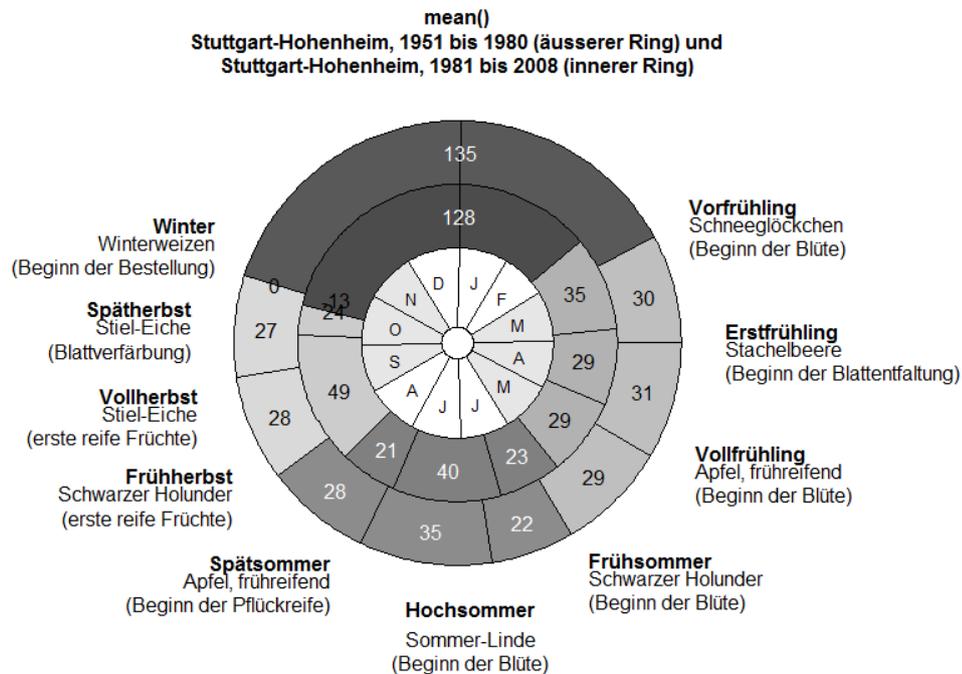


Abb. 4.6: Phänologische Uhr der Station Hohenheim. Vergleich der Perioden 1951 bis 1980 und 1981 bis 2008 berechnet mit dem arithmetischen Mittel.

Die phänologische Uhr zum Vergleich der Perioden 1951 bis 1980 (Periode 1) und 1981 bis 2008 (Periode 2) anhand der Mittelwerte zeigt klare Trends (Abb. 4.6). Der Winter in Periode 1 ist um 7 Tage länger, was damit zusammenhängt, dass die Vorfrühling-Phasen in Periode 2 früher eintreten. Alle phänologischen Jahreszeiten von Vorfrühling bis Frühherbst treten in Periode 2 früher ein als in Periode 1. Erst der Beginn des Vollherbstes tritt im Vergleich zu Periode 2 deutlich verzögert in Periode 1 ein. Der Winter hingegen tritt in Periode 2 wieder früher ein als in Periode 1. Der Spätherbst tritt in Periode 1 zum selben Zeitpunkt ein wie der Winter. In Periode 2 tritt der Spätherbst sogar 13 Tage nach dem Winter ein. Diese Diskrepanzen lassen sich damit erklären, dass die phänologischen Jahreszeiten an die phänologischen Phasen gekoppelt sind. Wenn die Phase des Spätherbstes im Mittel nach der Phase des Winters liegt, tritt der phänologische Winter vor dem phänologischen Spätherbst ein.

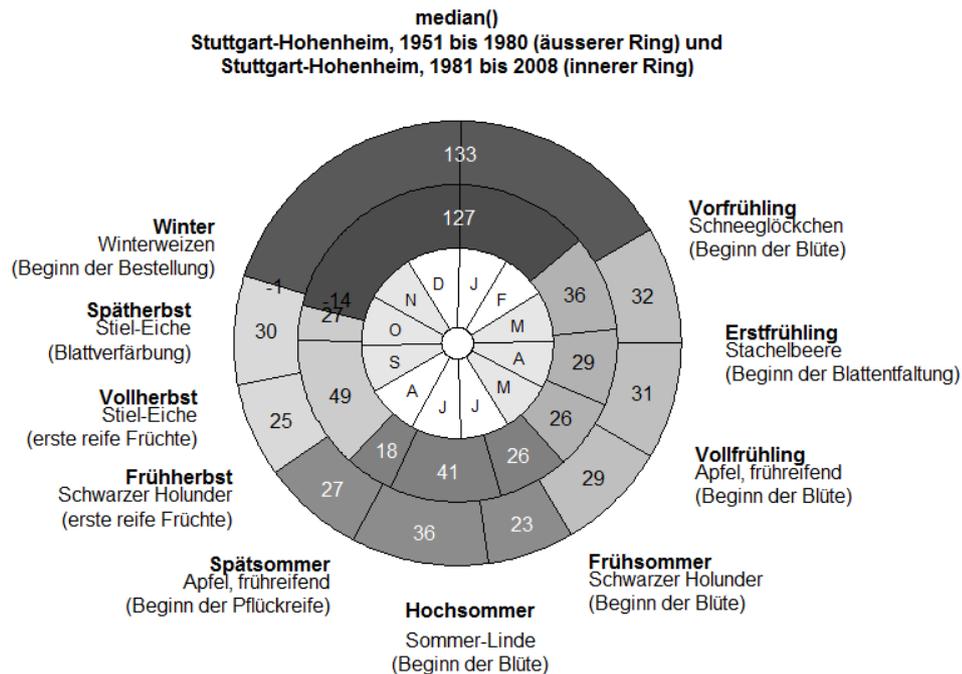


Abb. 4.7: Phänologische Uhr der Station Hohenheim. Vergleich der Perioden 1951 bis 1980 und 1981 bis 2008 berechnet mit dem Median.

Abb. 4.7 zeigt die Ausprägung der phänologischen Uhr berechnet anhand des Medians. Die Effekte, auf denen die Unterschiede beruhen, werden im Text zu den Abb. 5.6 und Abb. 5.7 (S. 68) beschreiben.

Die Unterschiede, die sich beim Vergleich Median gegen arithmetischen Mittelwert ergeben, scheinen nicht sehr groß. Im Zeitraum 1951 bis 1980 (Abb. 4.8) zeigt die Differenz zwischen Median und Mittelwert des Eintrittsdatums des Vorfrühlings zwei Tage. Dies deutet darauf hin, dass die Verteilung der entsprechenden phänologischen Phase leicht verzerrt ist. Alle folgenden phänologischen Jahreszeiten bis zum Vollherbst unterscheiden sich maximal um einen Tag. Hier müsste im Einzelnen beurteilt werden, ob diese Schiefverteilung der Daten auf erklärbaren Zusammenhängen beruht oder einem Rauschen entstammt. Die Dauer der phänologischen Jahreszeit Frühherbst ist bei Berechnung des Medians zwar 3 Tage kürzer, das Eintrittsdatum unterscheidet sich allerdings lediglich um einen Tag und hat damit vermutlich keinen großen Effekt. Dieser Effekt ist wohl aber beim Eintreten des Vollherbstes sichtbar, denn hier beträgt der Unterschied zwei Tage.

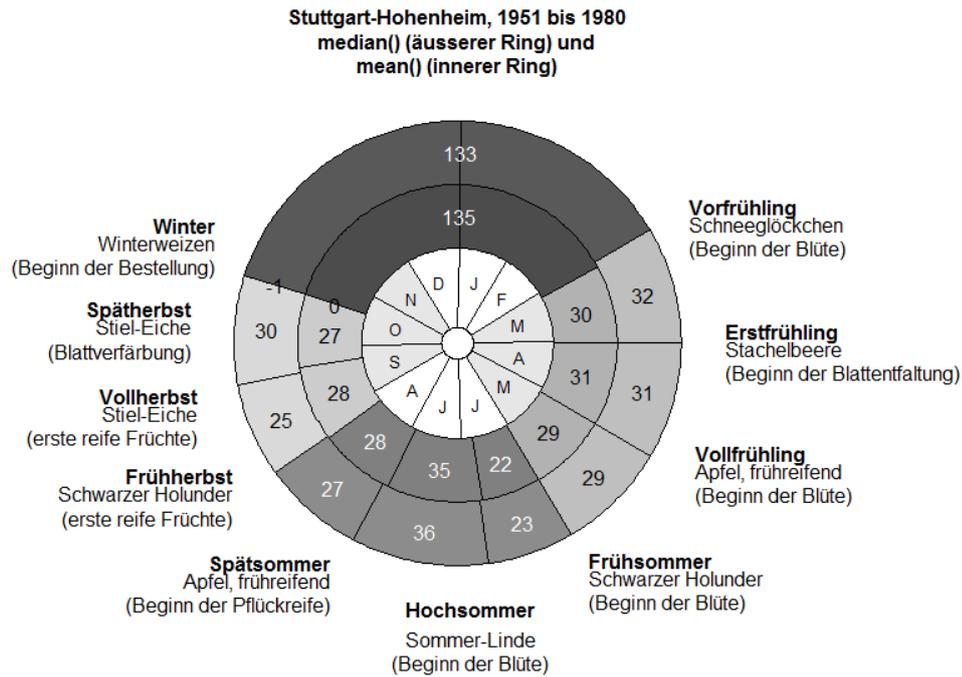


Abb. 4.8: Phänologische Uhr der Station Hohenheim. Vergleich von Median und arithmetischem Mittelwert für den Zeitraum 1951 bis 1980.

Im Zeitraum 1981 bis 2008 (Abb. 4.9) zeigen sich ähnliche Unterschiede, die jedoch in anderen phänologischen Jahreszeiten auftreten. In diesem Zeitraum sind die phänologischen Jahreszeiten Frühsommer, Frühherbst und Vollherbst betroffen. Der Frühsommer tritt bei Berechnung des Medians drei Tage früher ein. Dies deutet darauf hin, dass die hinteren 50 % der Datenreihe (Schwarzer Holunder - Beginn der Blüte (18)) ein größeres Gewicht haben, also spätere Eintrittsdaten die Datenreihe dominieren. Die Dauer des Frühherbstes weist bei Berechnung der beiden Mittel keinen Unterschied auf, das Eintrittsdatum findet allerdings zwei Tage früher bei Berechnung des Medians statt. Auch hier dominieren die hinteren 50 % der Datenreihe (Schwarzer Holunder - Fruchtreife (67)). Die gleiche Dauer kommt dadurch zustande, dass der Spätherbst bei Berechnung des Medians ebenfalls zwei Tage früher eintritt.

Im Gesamtzeitraum (Abb. 4.10) sind diese Effekte nicht mehr enthalten, da sich die Effekte der beiden Zeiträume ausniveliert haben. Lediglich der Effekt des Frühherbstes hat sich aufaddiert und zeigt das Eintreten der Phase vier Tagen später an. Da der Spätherbst, wenn man den Median berechnet, nur einen Tag früher Eintritt ist nicht nur der Spätsommer länger, sondern auch der Frühherbst kürzer. Dies deutet darauf hin, dass die Datenreihe des Frühherbstes im Gesamtzeitraum von früheren Eintrittsdaten

dominiert wird. Das Eintreten des Spätherbstes vor dem Winter zeigt bei beiden Mitteln einen negativen Wert. Dieser Effekt kommt also nicht durch die Wahl des Mittels, sondern durch die Wahl einer ungeeigneten Leitphase zustande.

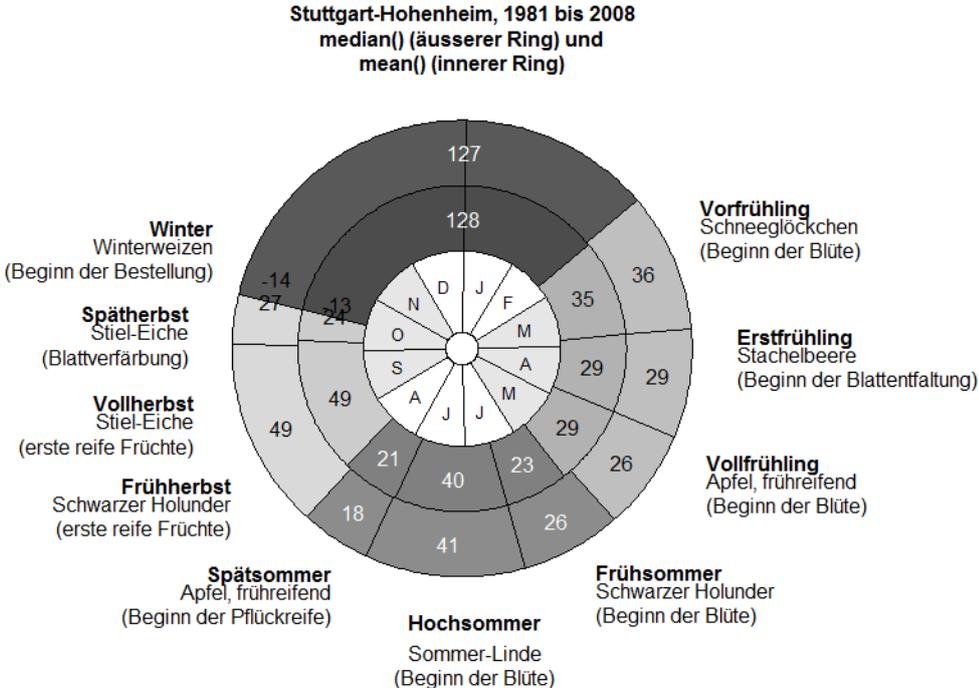


Abb. 4.9: Phänologische Uhr der Station Hohenheim. Vergleich von Median und arithmetischem Mittelwert für den Zeitraum 1981 bis 2008.

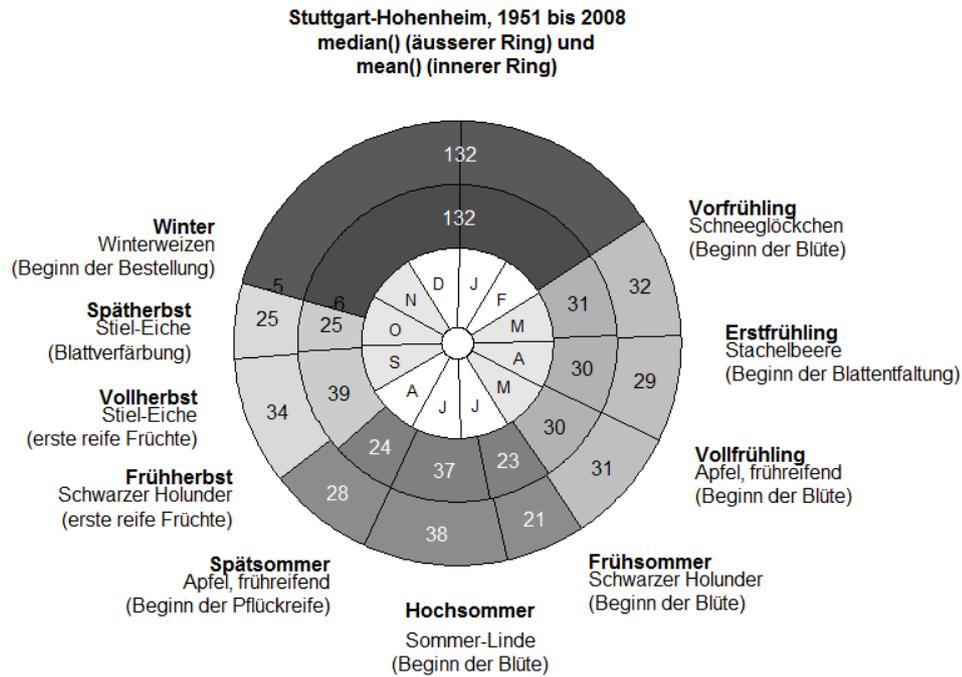
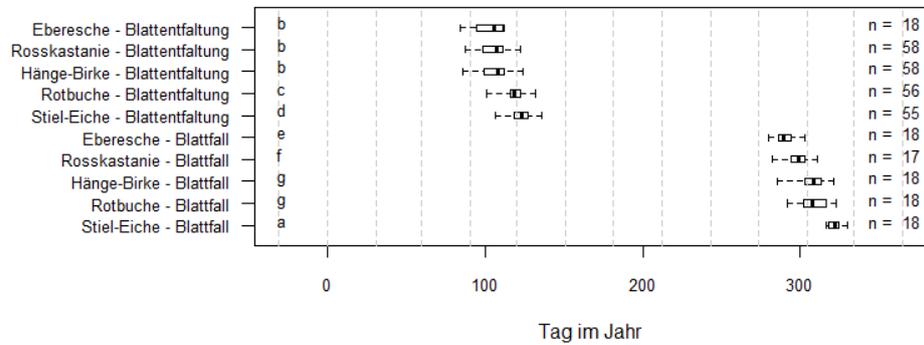


Abb. 4.10: Phänologische Uhr der Station Hohenheim. Vergleich von Median und arithmetischem Mittelwert für den Zeitraum 1951 bis 2008.

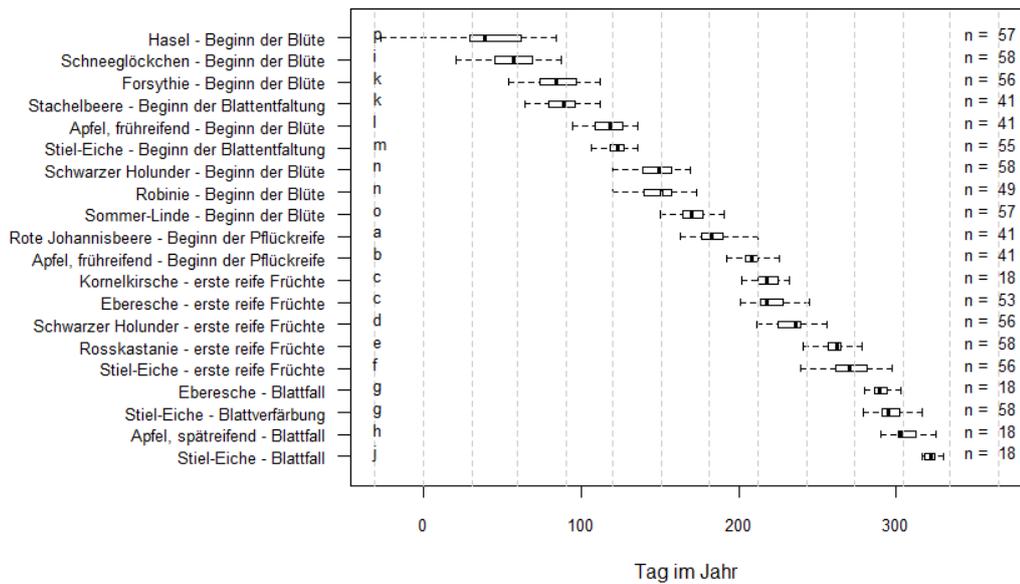
Der phänologische Kalender zu Phasen des Vegetationsbeginns und -endes einiger Bäume (Abb. 4.11 (a)) zeigt, dass die Phase 'Stiel-Eiche - Blattfall' (226) ein wesentlich engeres Spektrum zeigt, als die gleiche Phase der Buche (225) und außerdem deutlich später eintritt, laut Tab. 8.8 tritt der Blattfall bei der Stiel-Eiche 14 Tage nach der Rotbuche auf. Da die Blattentfaltung der beiden Bäume eng beieinander liegt, ist die Vegetationszeit der Stiel-Eiche länger. Der Eintrittszeitpunkt der Blattentaltung der Eberesche, der Rosskastanie und der Hänge-Birke findet laut Buchstabendarstellung zum selben Mittelwert statt. Die Phase Eberesche weist allerdings lediglich 18 Werte auf und kann daher nicht mit den anderen beiden Phasen verglichen werden. Ein Vergleich ist hier sowieso nicht angebracht, da diese Pflanzen kein relevantes Konkurrenzverhältnis haben.

Der Buchstabencode der Leit- und Ersatzphasen (Abb. 4.11 (b)) zeigt an, dass nicht alle Leit- und Ersatzphasen einen gleichen Mittelwert haben. Lediglich die phänologischen Jahreszeiten Erstfrühling, Frühsommer und Spätherbst zeigen gleiche Mittelwerte. Die Ersatzphase des Spätsommers und die Leitphase des Frühherbstes zeien ebenfalls einen gleichen Mittelwert. Allerdings weist die Ersatzphase des Spätsommers lediglich

18 Stichprobenwerte auf, während die Leitphase des Frühherbstes 53 Stichprobenwerte hatzwisee. Eine Vergleichbarkeit ist hier also nicht wirklich gegeben. Die Leitphase des Vorfrühlings zeigt extreme Werte, die bis ins davorliegende Jahre reichen. Doch selbst wenn der extremste Wert von dieser Datenreihe entfernt wird (als Ausreißer betrachtet



(a) Vegetationszeiten



(b) Leit- und Ersatzphasen

Abb. 4.11: phänologischer Kalender Auf der x-Achse sind die Tage eines Jahres abgebildet, auf der y-Achse sind sich die Phasen, die im Kalender dargestellt werden. Die Daten sind in Form eines Boxplots erfasst. Der Buchstabencode gibt an, dass Phasen mit unterschiedlichen Buchstaben, unterschiedliche Mittelwerte haben. $n = xx$ gibt an, wie viele Stichprobenwerte vorliegen.

Die Phase Hasel - Beginn der Blüte ist die einzige Phase, die korrigiert werden musste (Abb. 3.1). Einige Phasen wie die der Hasel - Beginn der Blüte oder der Phase 'Esche - Beginn der Blattentfaltung' (120) (Abb. 4.12 (a)) zeigen mehrerer Extremwerte im unteren Bereich der Häufigkeitsreihe, welche vom Boxplot sogar als Ausreißer bewertet werden. Auch liegen einige Phasen vor, die wie die Phase 'Fichte - Maitrieb' (17) diese Extremwerte am oberen Ende der Häufigkeitsreihe aufweisen (Abb. 4.12 (b)).

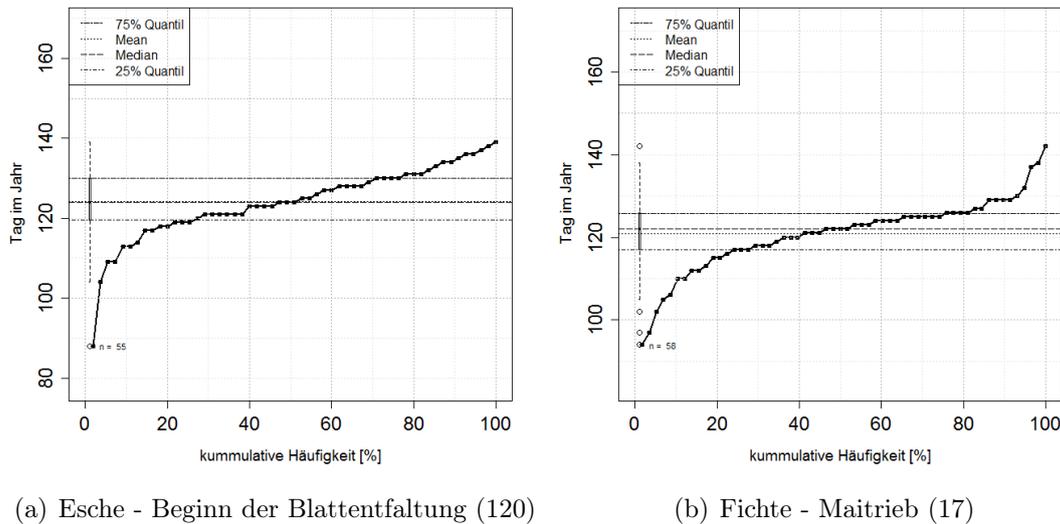
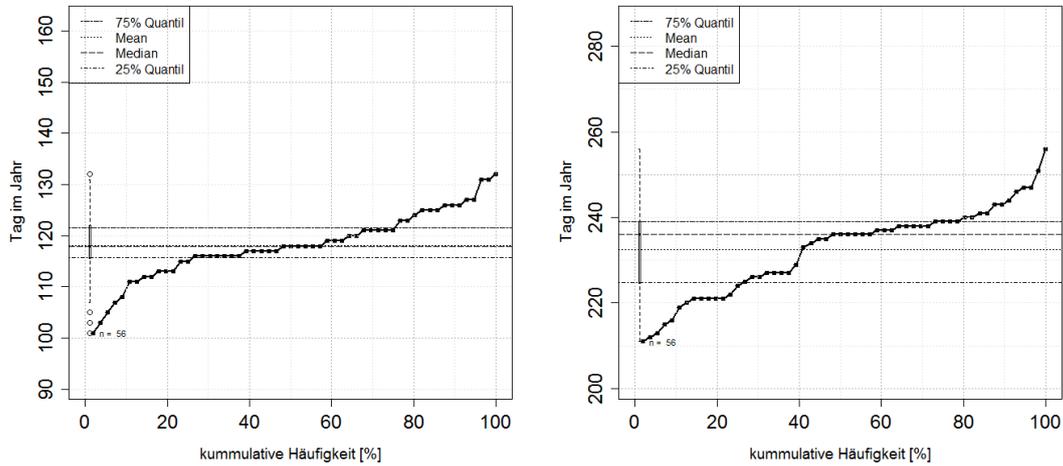


Abb. 4.12: Häufigkeitsanalyse. Die x-Achse zeigt die kummulative Häufigkeit, die y-Achse zeigt den Tag im Jahr der betrachteten Phase.

Die Phase Hasel - Beginn der Blüte zeigt unter allen getesteten Phasen den größten Abstand zwischen Minimalwert und Maximalwert (111) und den größten Interquartilabstand (33) (Tab. 8.8). Dies kommt durch die besonders extremen Werte und die relative Streckung der Verteilung zustande. Die Phase 'Rotbuche - Blattentfaltung' (12) (Abb. 4.13 (a)) zeigt den kleinsten Abstand zwischen Minimalwert und Maximalwert (30) und einen sehr kleinen Interquartilabstand (8,5). Die Phase 'Fichte - Maitrieb' (17) (Abb. 4.12 (b)) hingegen weist denselben Interquartilabstand (8,5), allerdings einen recht hohen Abstand zwischen Maximalwert und Minimalwert auf (48). Dies deutet auf eine eigentlich enge Verteilung der Daten mit einigen Extrempunkten und damit wenig Ähnlichkeit mit der Normalverteilung, bei der die Daten über einen recht weiten Bereich verteilt sind.

Einige Phasen (1, 2, 4, 67 (Abb. 4.13 (b)), 117, 121, 131) weisen inmitten der Häufigkeitsreihe einen Sprung auf, der mit drei bis zehn Tagen pro Prozentschritt über dem Durchschnitt von einem oder zwei Tagen liegt (Tab. 8.3 für die Kennziffern der Phasen).



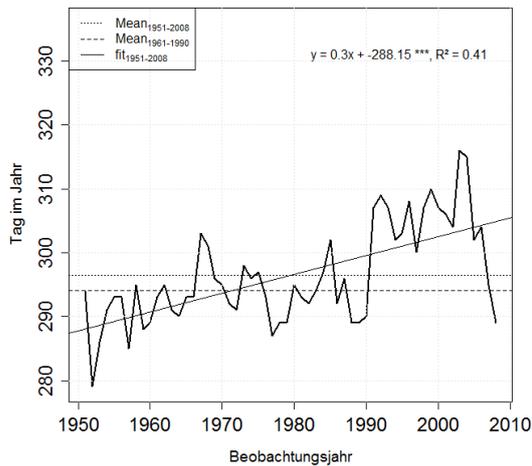
(a) Rotbuche - Blattentfaltung (12)

(b) Schwarzer Holunder - erste reife Früchte (67)

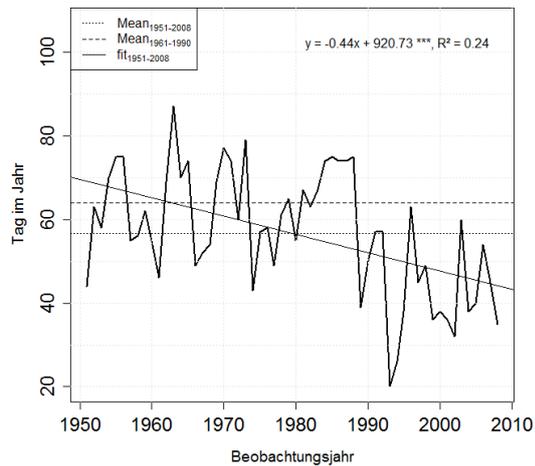
Abb. 4.13: Häufigkeitsanalyse. Die x-Achse zeigt die kumulative Häufigkeit, die y-Achse zeigt den Tag im Jahr der betrachteten Phase.

4.3 Entwicklungen in den Zeitreihen

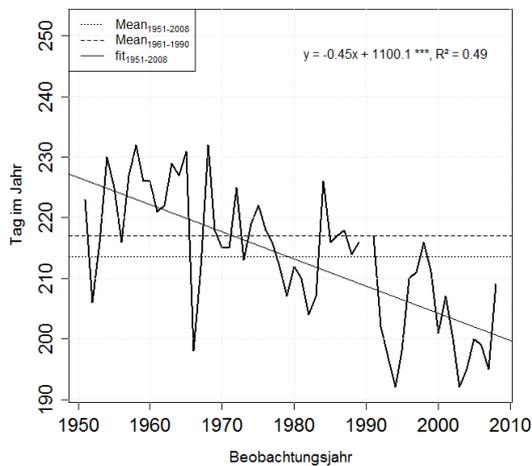
Im Zeitraum 1951 bis 1980 zeigen circa 41 % aller Phasen keinen signifikanten Trend, während es im Zeitraum 1951 bis 2008 28 % und im Zeitraum 1981 bis 2008 25 % sind. Dies deutet darauf hin, dass sich in den Jahren zwischen 1951 bis 1980 nicht so viele Veränderungen ergeben haben wie im Zeitraum 1981 bis 2008 (Tab. 8.9).



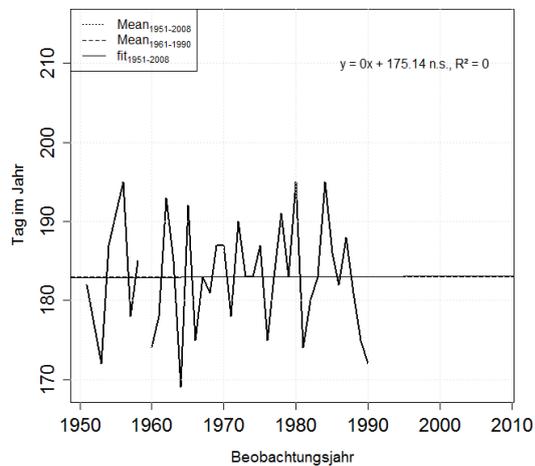
(a) Stiel-Eiche - Blattverfärbung (73)



(b) Schneeglöckchen - Beginn der Blüte (2)



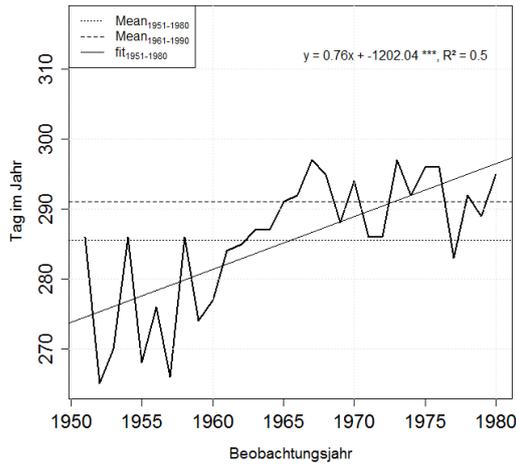
(c) Heidekraut - Beginn der Blüte (65)



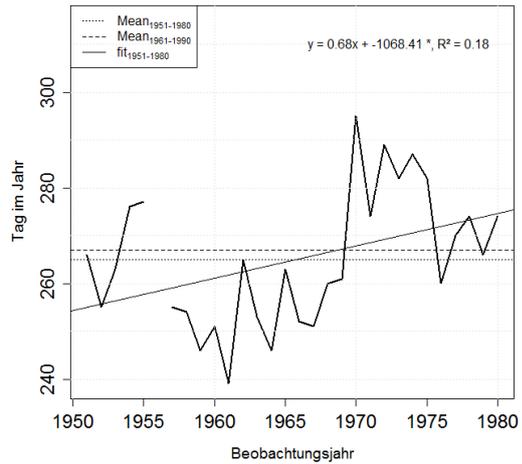
(d) Winter-Linde - Beginn der Blüte (175)

Abb. 4.14: Zeitreihen des Zeitraums 1951 bis 2008. Die x-Achse zeigt die Jahre, die y-Achse zeigt den Tag im Jahr der betrachteten Phase.

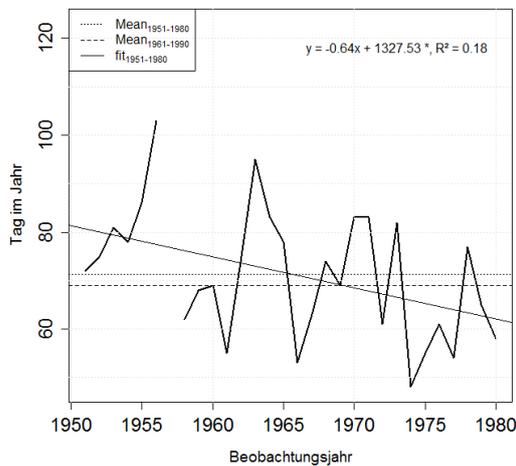
Im Zeitraum 1951 bis 2008 zeigen mit 23 Phasen knapp 30 % einen positiven Trend (Abb. 4.14 (a)), der allerdings lediglich bei 4 Phasen zum Signifikanzniveau $\alpha = 0.05$ signifikant ist (circa 5 % der Phasen). Alle anderen Phasen (circa 70 %) weisen einen negativen Trend auf (Abb. 4.14 (b) und (c)), wovon 28 Phasen zum Signifikanzniveau $\alpha = 0.05$ signifikant sind (circa 37 %). Die Phase 'Winter-Linde - Beginn der Blüte' (175) zeigt überhaupt keinen Trend (Abb. 4.14 (d)), wobei dies vermutlich damit zusammenhängt, dass hier die Werte nach 1990 fehlen (Tab. 8.9 ist nach dem Trend der Phasen sortiert).



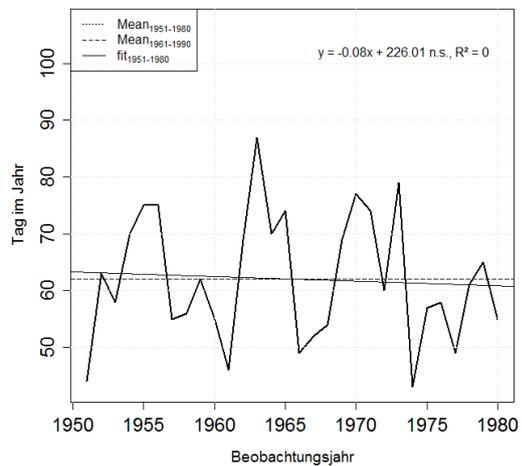
(a) Hänge-Birke - Blattverfärbung (74)



(b) Stiel-Eiche - erste reife Früchte (72)



(c) Hufflattich - Beginn der Blüte (3)

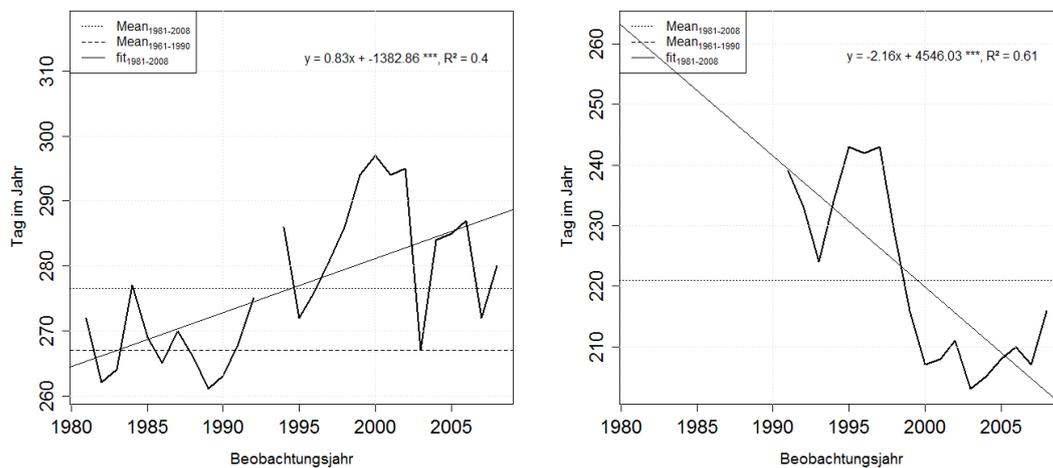


(d) Schneeglöckchen - Beginn der Blüte (2)

Abb. 4.15: Zeitreihen des Zeitraums 1951 bis 1980. Die x-Achse zeigt die Jahre, die y-Achse zeigt den Tag im Jahr der betrachteten Phase.

Im Zeitraum 1951 bis 1980 zeigen mit 40 Phasen circa 69 % einen positiven Trend (Abb. 4.15 (a) und (b)), der allerdings lediglich bei 12 Phasen (20 %) einen zum Signifikanzniveau $\alpha = 0.05$ signifikanten Wert zeigt. 17 Phasen (circa 29 %) zeigen einen negativen Trend (Abb. 4.15 (c)), davon sind 2 Phasen zum Signifikanzniveau $\alpha = 0.05$ signifikant (circa 3 %). Damit zeigen lediglich 24 % überhaupt einen signifikanten Trend. Da die Phasen 213 bis 228 in diesem Zeitraum noch nicht festgehalten wurden, kann man bei diesen nicht wissen, wie sich deren Trend entwickelt hat. Die Phase 'Schneeglöckchen - Beginn der Blüte' (1) zeigt überhaupt keinen Trend (Abb. 4.15 (d)) (Tab. 8.9).

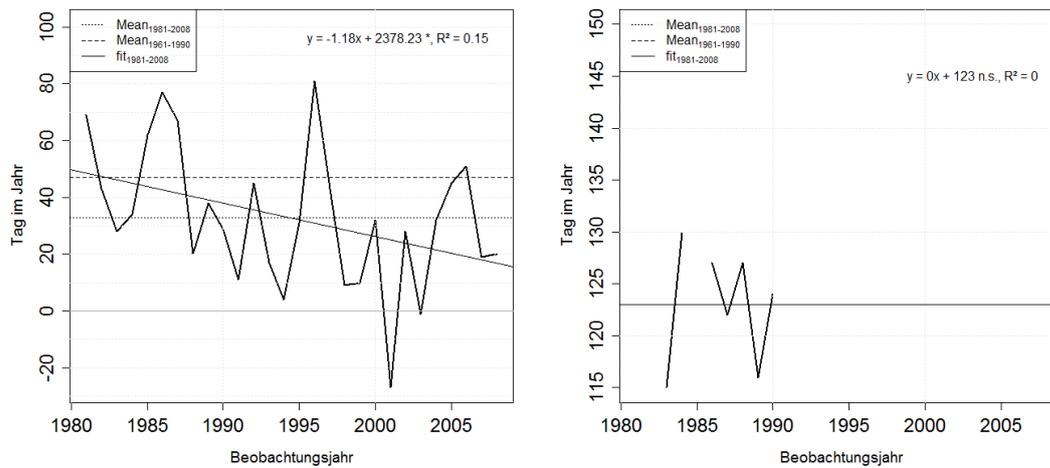
Im Zeitraum 1981 bis 2008 zeigen mit 10 Phasen nur circa 13 % einen positiven Trend (Abb. 4.17 (a)). 3 dieser Phasen (4 %) zeigen einen zum Signifikanzniveau $\alpha = 0.05$ signifikanten Trend an. 62 Phasen (circa 84 %) zeigen einen negativen Trend (Abb. 4.17 (b) und (c)), davon sind 29 Phasen (39 %) zum Signifikanzniveau $\alpha = 0.05$ signifikant. Die Phasen 'Europäische Lärche - Nadelentfaltung' (117) und 'Rotbuche - Beginn der Blüte' (124) zeigen überhaupt keinen Trend (Abb. 4.17 (d)) (Tab. 8.9).



(a) Stiel-Eiche - erste reife Früchte (72)

(b) Zweiggriffeliger Weißdorn - erste reife Früchte (228)

Abb. 4.16: Zeitreihen des Zeitraums 1981 bis 2008. (I) Die x-Achse zeigt die Jahre, die y-Achse zeigt den Tag im Jahr der betrachteten Phase.



(a) Schneeglöckchen - Beginn der Blüte (1) (b) Rotbuche - Beginn der Blüte (124)

Abb. 4.17: Zeitreihen des Zeitraums 1981 bis 2008. (II) Die x-Achse zeigt die Jahre, die y-Achse zeigt den Tag im Jahr der betrachteten Phase.

Wie Abb. 4.18 zeigt, hat sich die mittlere Tagestemperatur im Zeitraum 1951 bis 2008 in allen Monaten in Hohenheim mit einem positiven Trend entwickelt. Dabei sind alle Monate bis auf den September, den November und den Dezember zum Signifikanzniveau $\alpha = 0.05$ signifikant. Die maximalen und minimalen Tagestemperaturwerte verhalten sich sehr ähnlich wie die mittleren Tagestemperaturwerte. Die maximale Tagestemperatur entwickelt sich allerdings über die Jahre hinweg mit nicht so stark signifikanten Trends. Der Trend der minimalen Temperatur 5 cm über dem Boden zeigt lediglich im September einen signifikanten Trend, der negativ ist. Bei den Bodentemperaturen fehlen einige Meßwerte, daher lässt sich ein Signifikanzniveau lediglich visuell abschätzen. Sollte hier überhaupt Signifikanz vorliegen, dann höchstens zum Niveau $\alpha = 0.3$ in den Wintermonaten. Der Einfluss der Sonne hat sich in diesem Zeitraum lediglich im Januar signifikant entwickelt. Hier besteht ein Trend hin zu einer längeren Sonnenscheindauer. Der Schneefall hat sich kaum signifikant verändert und zeigt lediglich im Januar und Februar fallende Trends. Die relative Luftfeuchtigkeit weist ebenfalls fallende Trends in allen Monaten auf (Abb. 4.19). Diese Trends sind allerdings nicht signifikant und werden hauptsächlich durch die niedrigen Werte verursacht, die zwischen 1980 und 2000 zu verzeichnen waren. Der Niederschlag hat sich im März und Oktober signifikant mit steigendem Trend entwickelt. Im März scheint dies auf zwei Extremwerte zurückzuführen zu sein, die innerhalb sonst ähnlicher Fluktuationen auftreten. Im Oktober hat sich ein klarer Trend ausgeprägt.

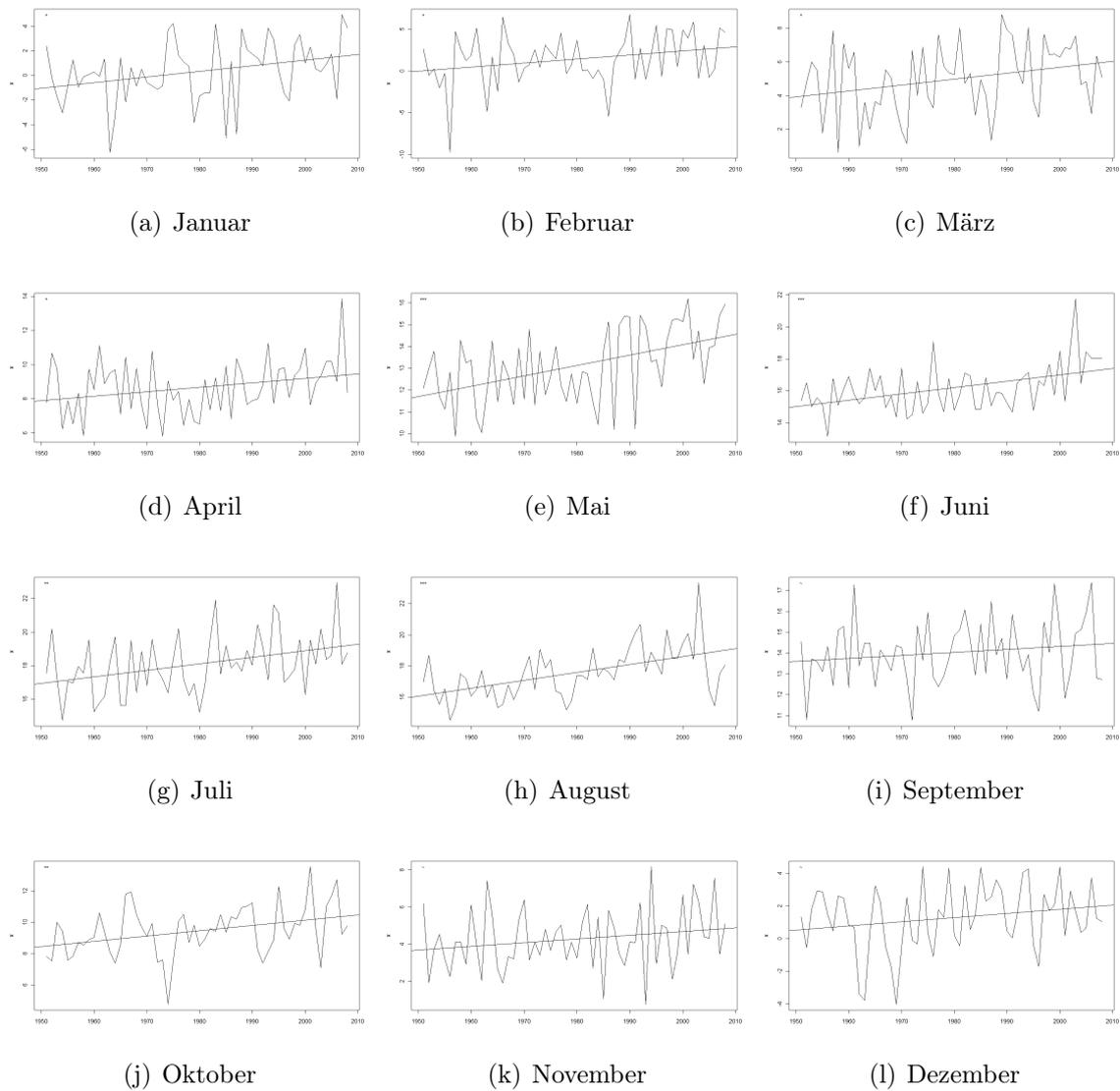


Abb. 4.18: Zeitreihen der mittleren Lufttemperatur in 2 m über dem Boden. Die x-Achse zeigt die Jahre, die y-Achse zeigt den Wert der Temperatur. Die Regressionslinie zeigt den linearen Trend der Daten, dessen Signifikanzniveau mit dem Zeichen im oberen linken Eck angegeben wird.

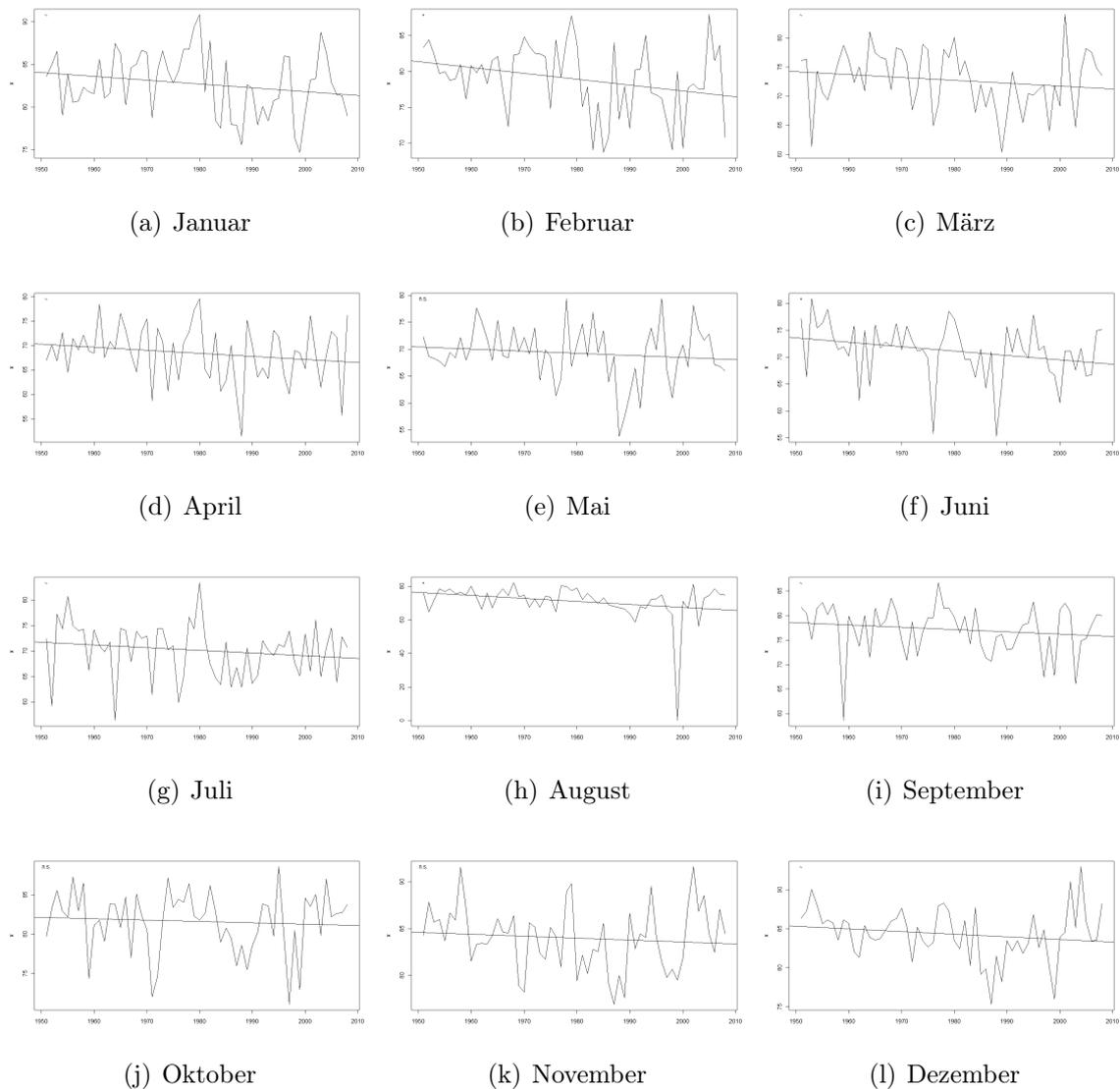
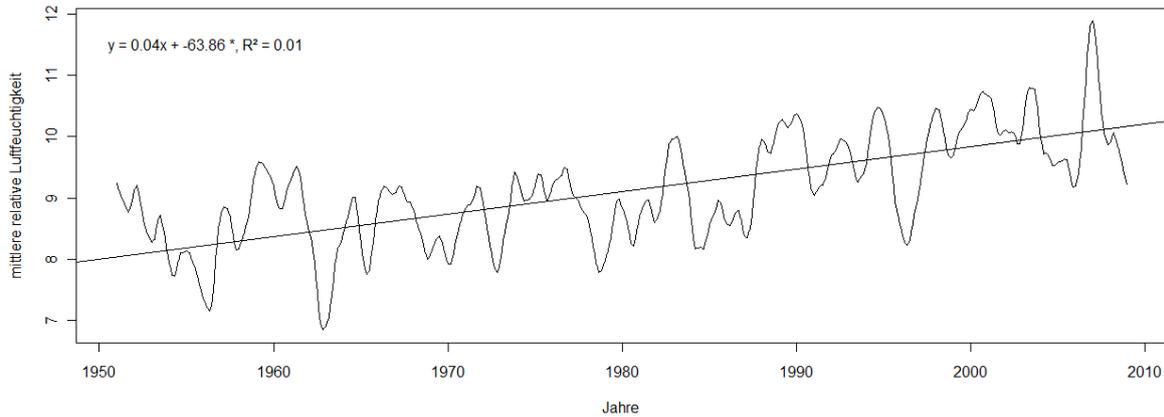


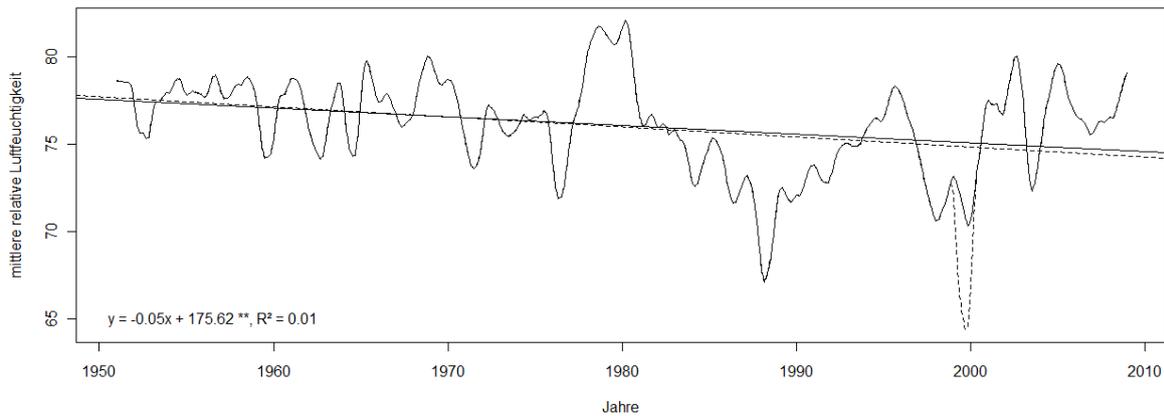
Abb. 4.19: Zeitreihen der mittleren relativen Luftfeuchtigkeit. Die x-Achse zeigt die Jahre, die y-Achse zeigt den Wert der relativen Luftfeuchtigkeit. Die Regressionslinie zeigt den linearen Trend der Daten, dessen Signifikanzniveau mit dem Zeichen im oberen linken Eck angegeben wird.

Die Zeitreihendekomposition zeigt den deutlichen Trend, der sich in den Daten zur mittleren Lufttemperatur in 2 m über dem Boden abzeichnet (Abb. 4.20 (a)). Die Dekomposition der anderen Temperaturwerte zeigt ein ähnliches Verhalten. Die Bodentemperaturen können nicht nach ihrer Saisonalität untersucht werden, da wie schon erwähnt, Daten fehlen. Nimmt man an, dass sich diese fehlenden Daten allerings um den Mittelwert sammeln, ergäben sich bei den Bodentemperaturen keine nennenswerten Trends über die gesamte Zeitreihe, lediglich die vermutlich an den Jahreszeiten orientierten Fluktuationen innerhalb eines Jahres. Die Schneemenge zeigt über den Gesamtzeitraum

einen leicht fallenden Trend. Die relative Luftfeuchtigkeit zeigt seit den 1980er Jahren einen fallenden Trend, der sich bis in die 2000er Jahre allerdings wieder an das Niveau von vor 1980 angeglichen hat. Abb. 4.20 (b) zeigt allerdings, dass dieser Trend nach wie vor statistisch hoch signifikant ist. Der Niederschlag weist einen schwachen Trend hin zu höheren Niederschlagsmengen auf.



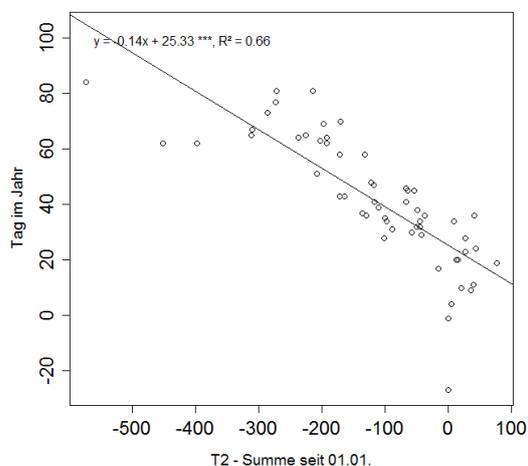
(a) mittlere Temperatur in 2 m über dem Boden



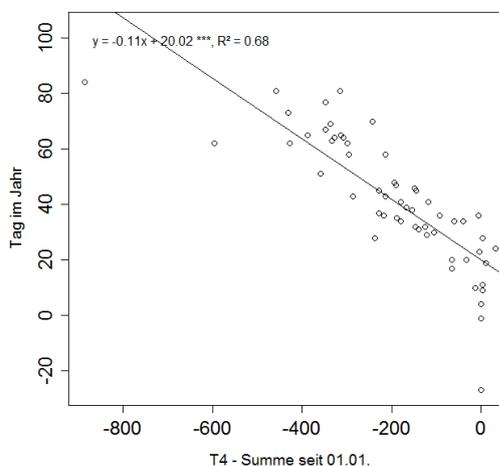
(b) mittlere relative Luftfeuchtigkeit

Abb. 4.20: Trendkomponente der Zeitreihendekomposition. Auf der x-Achse ist die Zeit dargestellt, lediglich die Jahre sind niedergeschrieben, allerdings ist die Achse für Tage aufgelöst. Die y-Achse zeigt den Wert der Trendkomponente der klimatischen Variable. Die Regresionsgleichung gilt für die durchgezogene Linie.

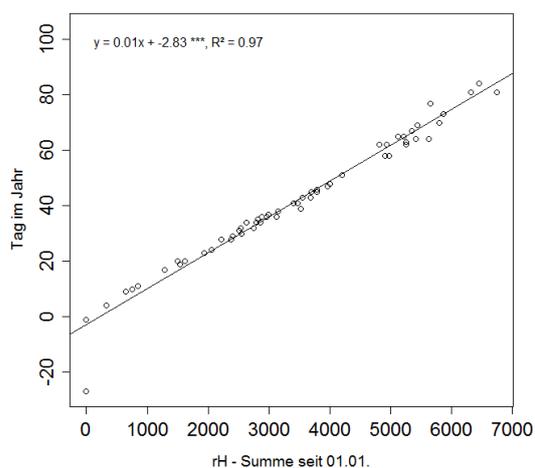
4.4 Zusammenhänge zwischen Phänologie und Klima



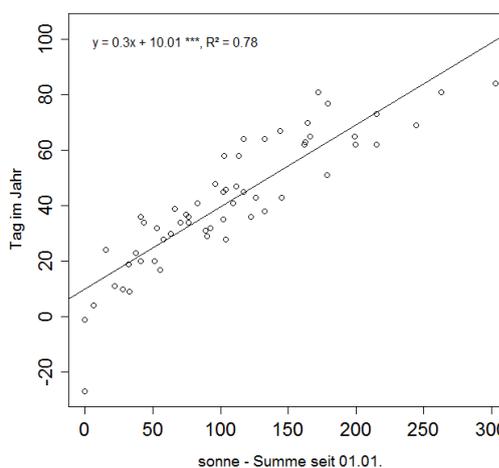
(a) minimale Temperatur in 2 m über dem Boden



(b) minimale Temperatur in 5 cm über dem Boden



(c) relative Luftfeuchtigkeit



(d) Sonnenscheindauer

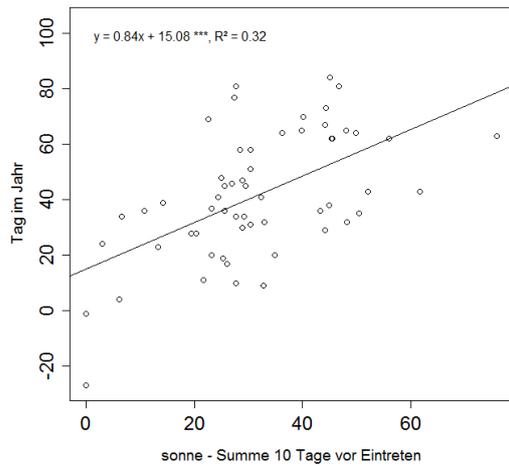
Abb. 4.21: Korrelationsschaubild der Phase 'Hasel - Beginn der Blüte' (1) für den Zeitraum 1951 bis 2008. Die x-Achse zeigt den Wert der Summe oder des Mittelwerts von Interesse, die y-Achse zeigt den Tag im Jahr der Phase.

Tab ?? zeigt den Output der Korrelationen der Phase 'Hase - Beginn der Blüte' (1). Alle weiteren dieser Tabellen befinden sich auf dem beiliegenden Datenträger und werden aus Platzgründen nicht abgedruckt. Da nicht jeder der dort abgebildeten Werte in dieser

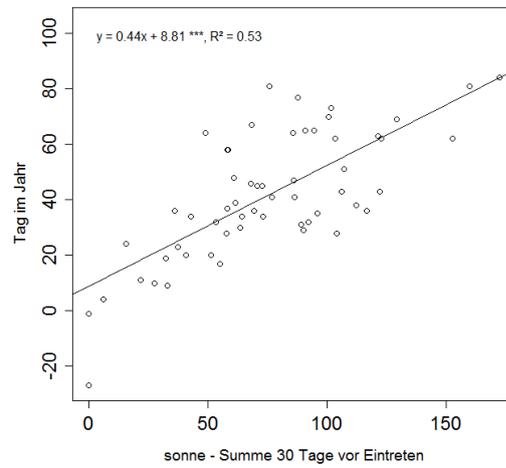
Arbeit diskutiert werden kann, soll an einigen Beispielen veranschaulicht werden, wie das Vorgehen zur Analyse dieser Werte ist. Ersteinmal muss geprüft werden, ob überhaupt eine Korrelation zwischen den berechneten klimatischen Werten und der phänologische Zeitreihe besteht. Hierzu werden die p-Werte des Korrelationstestes betrachtet. Dabei fällt auf, dass die allermeisten Werte nicht anzeigen, dass die Korrelation zwischen den beiden betrachteten Variablen signifikant von Null verschieden ist. Da die Funktion `cor.test()` auf die Nullhypothese ob die Korrelation gleich Null ist getestet, zeigt ein p-Wert kleiner $\alpha = 0.05$, dass die Korrelation zu diesem Niveau signifikant von Null verschieden ist, also als gegeben betrachtet werden kann. Einige p-Werte zeigen den Wert 0, was bei Runden auf zwei Nachkommastellen bedeutet, dass die Zahl kleiner oder gleich 0,0049 ist. Diese Werte lassen sich bei allen klimatischen Variablen finden. Die minimale Lufttemperatur in 2 m über dem Boden zeigt dabei mit 0,66 unter den Lufttemperaturwerten in 2 m über dem Boden das höchste Bestimmtheitsmaß (Abb. 4.21 (a)). Dieser Wert wird gefunden, wenn man die Temperatursumme seit dem 01.01. des laufenden Jahres als erklärende Variable für die phänologischen Werte heranzieht. Die Lufttemperatur in 5 cm über dem Boden zeigt bei derselben Temperatursumme ein R^2 von 0.68 (Abb. 4.21 (b)). Die Bodentemperaturen in 2 und 5 cm Tiefe zeigen ein R^2 von 0.28 und 0.32 beim Mittelwert für den Monat Januar. Der Niederschlag zeigt den größten Effekt bei der Summe seit dem 02.01. des laufenden Jahres. Hier liegt der Wert bei 0.56. Die relative Luftfeuchtigkeit zeigt ein R^2 von 0.97 bei der Summe seit dem 01.01. des laufenden Jahres (Abb. 4.21 (c)). Die Summe der 50 Tage vor Eintreten der Phase zeigt lediglich einen R^2 -Wert von 0.82. Hier werden die 50 Tage jedes Jahres ausgewählt, die tatsächlich vor dem Eintreten der Phase liegen. Auch die gesamte Sonnenscheindauer (Summe der Sonnenstunden pro Tag) und die Schneemenge zeigen bei der Summe zum 01.01. des laufenden Jahres das höchste R^2 . Bei der Sonnenscheindauer liegt dies bei 0.78 (Abb. 4.21 (d)), bei der Schneemenge bei 0.44.

Es lässt sich feststellen, dass das Bestimmtheitsmaß mit der Zunahme der aufaddierten Tage bei jeder klimatischen Variable zunimmt (Abb. 4.22). Bemerkenswert ist außerdem, dass sich die höchsten Bestimmtheitsmaße bei den Summen finden lassen (Abb. 4.21 bis Abb. 4.23).

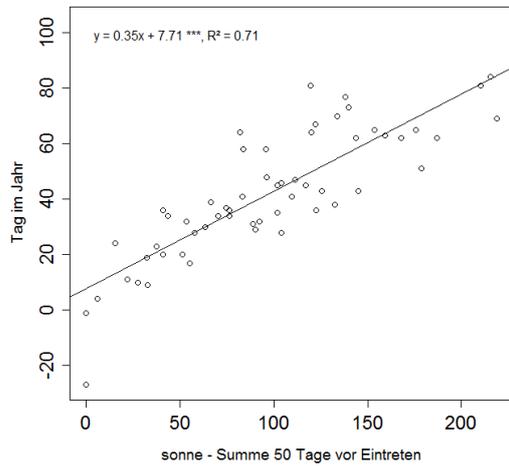
Die Mittelwerte zeigen R^2 -Werte von circa 0.4 als Höchstwerte. Die maximale Lufttemperatur in 2 m über dem Boden zeigt ein R^2 von 0.41 beim Januarmittel. Die Bodentemperatur in 5 cm Tiefe zeigt ein R^2 von 0.32, in 2 cm Tiefe liegt dies bei 0,28. Die R^2 -Werte des Niederschlags, der relativen Luftfeuchtigkeit und der Sonnenscheindauer liegen bei circa 0.1, das der Schneemenge bei 0.19.



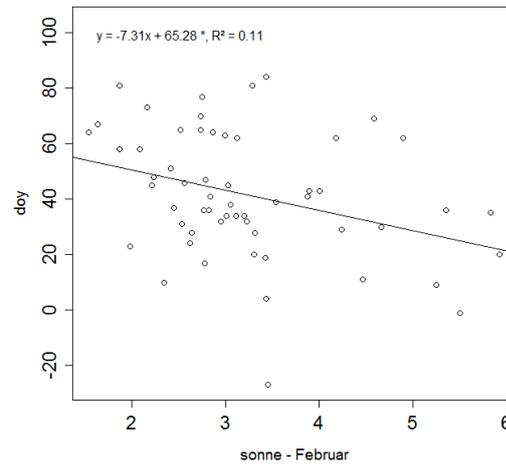
(a) Sonnenscheindauer



(b) Sonnenscheindauer

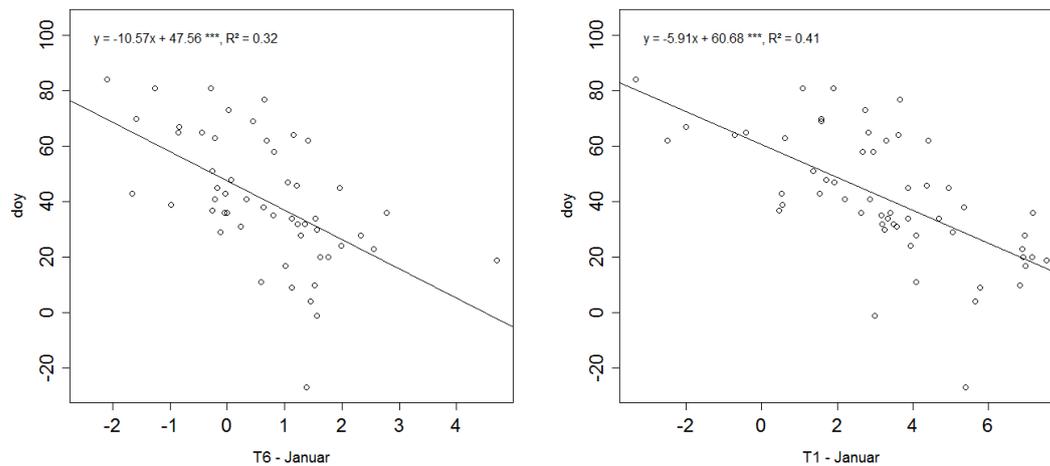


(c) Sonnenscheindauer



(d) Sonnenscheindauer

Abb. 4.22: Korrelationschaubild der Phase 'Hasel - Beginn der Blüte' (1) für den Zeitraum 1951 bis 2008. Die x-Achse zeigt den Wert der Summe oder des Mittelwerts von Interesse, die y-Achse zeigt den Tag im Jahr der Phase.



(a) Bodentemperatur in 5 cm Tiefe

(b) maximale Temperatur in 2 m über dem Boden

Abb. 4.23: Korrelationsschaubild der Phase 'Hasel - Beginn der Blüte' (1) für den Zeitraum 1951 bis 2008. Die x-Achse zeigt den Wert der Summe oder des Mittelwerts von Interesse, die y-Achse zeigt den Tag im Jahr der Phase.

Tab. 8.18 zeigt die Differenz der Korrelationstabelle zweier Zeiträume. Hier wurde der Zeitraum 1951 bis 1980 (Periode 1) vom Zeitraum 1981 bis 2008 (Periode 2) abgezogen. So kann dargestellt werden, ob sich statistische Veränderungen in der Wirkung der klimatischen Variablen auf die Phänologie ergeben haben. Ist beispielsweise der Effekt der Januarartemperatur auf die Phase 'Hasel - Beginn der Blüte' (1) in Periode 2 größer als in Periode 1, ergibt sich ein positiver Wert, ist der Effekt größer in Periode 1, ergibt sich ein negativer Wert. Sobald für eine Phase und ein Klimamaß ein Wert gefunden wird, der von Null abweicht, hat man bewiesen, dass das Klimamaß die phänologische Phase nicht statisch beschreibt. Man kann dann annehmen, dass die klimatische Variable, beziehungsweise das Klimamaß dynamisch mit anderen Klimamaßen oder klimatischen Variablen an der Erklärung der phänologischen Phase beteiligt sein muss. Hieraus lassen sich sehr viele Informationen ablesen und interpretieren, wenn diese mit den Informationen aus den anderen Methoden kombiniert werden. So ist beispielsweise zu sehen, dass sich die p-Werte der Korrelation stark zwischen den beiden Zeiträumen verändern. Viele der berechneten klimatischen lassen sich nach dem `cor.test()` in den beiden Zeiträumen unterschiedlich mit den phänologischen Daten korrelieren. Die p-Werte der Lufttemperatur in 2 m über dem Boden ändern ihr Signifikanzniveau teilweise so drastisch, dass beispielsweise bei der maximalen Lufttemperatur in 2 m über dem Boden die Summe seit dem 01.01. und die Summe der 50, 40 und 30 Tage vor dem Eintreten der Phase nicht mehr signifikant von Null verschieden sind. Auch die p-Werte der Mittelwerte für die Frühlings- und Sommermonate sind signifikanter geworden, unterschreiten das Niveau von 0.1 allerdings noch nicht. Bei der minimalen Lufttemperatur

in 2 m über dem Boden ergeben sich die Änderungen für die Frühlings- und Sommermonate ebenfalls, die Änderungen in den Summen ergeben sich hier allerdings nicht. Die mittlere Lufttemperatur in 2 m über dem Boden scheint die Tatsache widerzuspiegeln, dass die Phase in Periode 2 um 17 Tage früher eintritt. Die Korrelation der dreimonatigen Mittel von Januar/Februar/März und Dezember/Januar/Februar sind in Periode nicht mehr signifikant von Null verschieden. Ebenso wird der zweimonatige Mittelwert von Februar/März weniger signifikant, während der zweimonatige Mittelwert von Januar/Februar signifikanter wird. Dieser zeigt in Periode 2 einen Wert von 0.11. (Die Tabellen der beiden Einzelzeiträume lassen sich ebenfalls auf dem beiliegenden Datenträger einsehen.). Die Bodentemperatur in 2 cm Tiefe des dreimonatigen Mittels von Januar/Februar/März ändert sich zum Wert 0.87 und rutscht damit aus der Signifikanz. Die Korrelation mit dem mittleren Niederschlag des Monats März wird signifikanter in Periode 2 und zeigt einen p-Wert von 0.1, während die Korrelation mit dem Niederschlag im April weniger signifikant wird und einen p-Wert von 0.99 zeigt. Die Veränderung im p-Wert liegt bei dem Wert für den Monat März bei -0.77 und für den Monat April bei 0.78 . Bei der relativen Luftfeuchtigkeit ändern sich die p-Werte nach demselben Muster. Hier fällt allerdings zusätzlich auf, dass die Korrelation signifikant von Null verschieden wird. Sowohl die zweimonatigen, als auch die dreimonatigen Mittel am Ende des Jahres verlieren teils stark an Signifikanz. Die p-Werte der Sonne zeigen, dass der zweimonatige Mittelwert von Januar/Februar in Periode 2 nicht mehr signifikant von Null verschieden ist, während er das in Periode 1 noch war. Die Korrelation mit dem dreimonatigen Mittel von Dezember/Januar/Februar der Schneemenge wird weniger signifikant und zeigt in Periode 2 quasi keine Unterschiede zu Null mehr. Auch die Signifikanz der Korrelation mit Schneemenge der umliegenden dreimonatigen Mittel nimmt ab. Die Signifikanz der Korrelation mit den zweimonatigen Mitteln nimmt hingegen leicht zu, die Korrelation ist mit p-Werten von 0.45 für Dezember/Januar und 0.59 für November/Dezember noch weit von einem wirklichen signifikanten Unterschied zu Null entfernt. Das zweimonatige Mittel für Januar/Februar zeigt immerhin einen p-Wert von 0.13.

Das Bestimmtheitsmaß ändert sich mit diesen Verschiebungen in der Korrelation auch. Das R^2 der relativen Luftfeuchtigkeit verliert beispielsweise um 0.24 in Periode 2 für die Summe seit dem 01.02. des laufenden Jahres. Die Summen der maximalen und minimalen Lufttemperatur in 2 m über dem Boden zeigen fast alle höhere Bestimmtheitsmaße, während die Summen der mittleren Lufttemperatur in 2 m über dem Boden diesem Trend nicht folgen und eher geringere Bestimmtheitsmaße anzeigen. Im Allgemeinen lässt sich außerdem beobachten, dass die R^2 -Werte des Februarmittels bei allen Temperaturwerten überdurchschnittlich gefallen sind. Auch Mittelwerte, in welchen der März beinhaltet ist, haben in Periode 2 an Einfluss verloren. Die Summe der 20, 30, 40 und 50 Tage vor Eintritt der Phase bei der Lufttemperatur in 5 cm über dem Boden haben ebenfalls deutlich zugenommen (um circa 0.3 jeweils). Das Bestimmtheitsmaß der Bodentemperaturen ändert sich kaum im Vergleich zwischen Periode 1 und Periode 2. Das Bestimmtheitsmaß der Sonnenscheindauer 20, 30 und 40 Tage vor Eintreten der Phase hat sich in Periode 2 um 0.3 erhöht und liegt bei 0.6, 0.68 und 0.79. Das Bestimmtheitsmaß der Summe seit dem 02.01. und seit dem 03.01. hat sich hier um circa 0.16 verringert, während es bei der Summe seit dem 01.01. um 0.07 zugenommen hat. Die

mittlere Schneemenge von Februar und März hat sich um 0.18 und 0.22 verringert. Das Bestimmtheitsmaß der Summe der Schneemenge 20 Tage vor Eintreten der Phase hat sich um 0.21 erhöht, das der Summe seit dem 03.01. hat sich um 0.16 verringert.

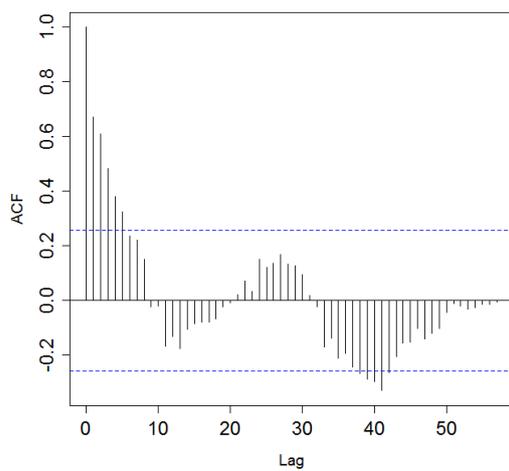
5 Diskussion

5.1 Diskussion der Ergebnisse

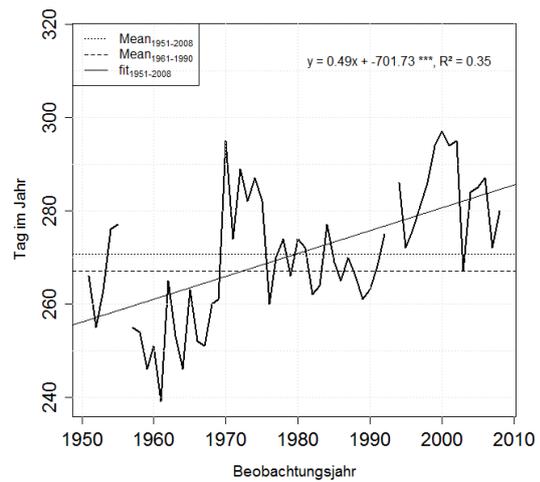
Die **Verteilung** der Daten ist nicht endgültig geklärt. Theoretisch könnte für die phänologischen Phasen neben der Normalverteilung ebenfalls eine Gleichverteilung angenommen werden. Gerade die klimatischen Daten liefern, aufgrund der hohen Datendichte starke Hinweise darauf, dass die Normalverteilung abgelehnt werden muss. Die Daten müssten auf ihre Korrelation dann mit einem Spearmanschen Rangkorrelationstest untersucht werden.

Die **Autokorrelation der klimatischen Variablen** stellt ein Problem dar, da diese die Korrelationstabelle in der Art beeinflusst, dass sie hohe Bestimmtheitsmaße für die Beziehung von Werten zeigt, die in der Realität eher nicht voneinander abhängig sein können. Ein Beispiel ergibt sich aus der Tatsache, dass die Augustwerte, die mit der 'Phase Hasel - Beginn der Blüte' (1) korrelieren, sehr hohe Bestimmtheitsmaße ergeben. Da diese Phase im Durchschnitt am 42. Tag im Jahr stattfindet und das Maximum der 84. Tag im Jahr darstellt, könnten die Augustwerte lediglich Einfluss auf die Blüte des folgenden Jahres haben. Da also nicht schlüssig erklärt werden kann, wie die Augustwerte auf die Blüte der Hasel derart wirken sollten, dass sie das Eintreten der Blüte im Winter beeinflussen, wohl aber eine Autokorrelation zwischen den Januar- und Augustwerten von etwa -0.9 besteht und die Januarwerte aufgrund der zeitlichen Nähe zum Eintreten der Phase einen direkten Einfluss haben, liegt es nahe, dass die Augustwerte lediglich aufgrund der sehr hohen Autokorrelation in der statistischen Berechnung einen so hohen Einfluss haben. Die **Autokorrelation der phänologischen Daten** kann nicht signifikant diagnostiziert werden. Trotzdem können Trends in der Autokorrelation gefunden werden. Diese Trends müssen sich aufgrund der Klimaabhängigkeit der phänologischen Daten irgendwie in den klimatischen Daten widerspiegeln. Ein gutes Beispiel, dies zu verdeutlichen, zeigt die Phase 72 (Stiel-Eiche - erste reife Früchte, Abb. 5.1). Die ACF deutet eine Saisonalität an, die in der Zeitreihe bestätigt werden kann.

Ein Blick in die **Korrelationstabelle** der Phase zeigt, dass die Regression mit der Summe seit dem 01.03. des laufenden Jahres der relativen Luftfeuchtigkeit ein Bestimmtheitsmaß von 0.62 zeigt (Abb. 5.4). Das R^2 der Summe der 50 Tage vor Eintreten der Phase der minimalen Lufttemperatur in 5 cm über dem Boden und der maximalen Lufttemperatur in 2 m über dem Boden zeigt einen Wert von 0.59 (Abb. 5.3).

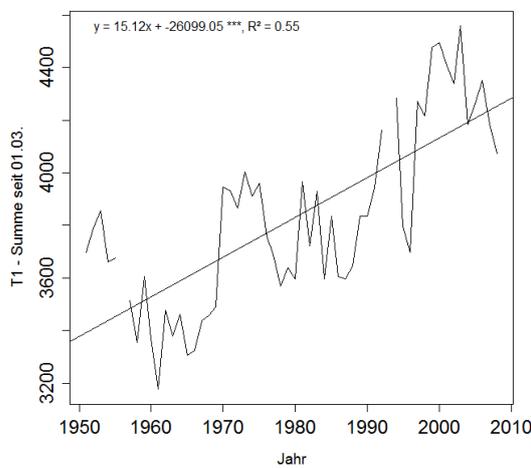


(a) Autokorrelationsfunktion

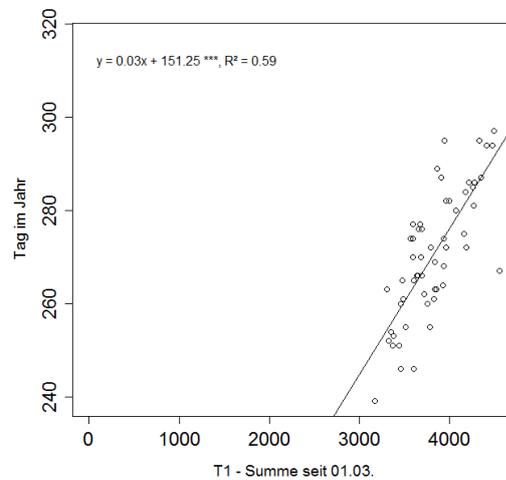


(b) Zeitreihe

Abb. 5.1: 'Stiel-Eiche - erste reife Früchte' (72) Dargestellt sind die Autokorrelationsfunktion und die Zeitreihe der Phase. Die ACF deutet eine Saisonalität an. Die Werte tendieren gegen lokale Maxima und Minima. Dieses Muster lässt sich in der Zeitreihe wiederfinden.

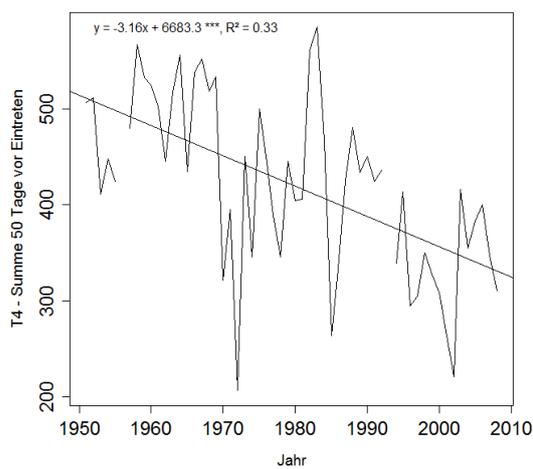


(a) Zeitreihe

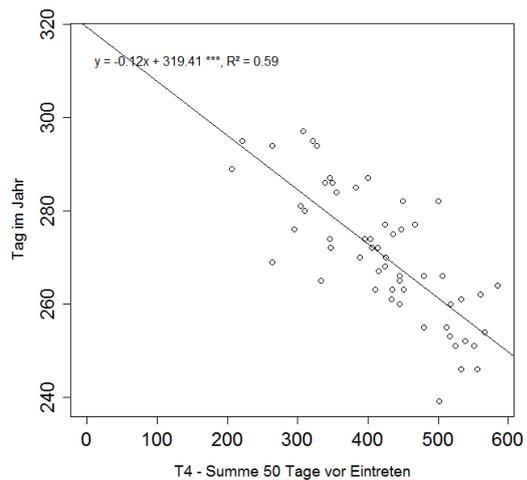


(b) Korrelationsschaubild

Abb. 5.2: Summe der maximalen Lufttemperatur in 2 m über dem Boden seit dem 01.03. in Abhängigkeit der Phase 'Stiel-Eiche - erste reife Früchte' (72).

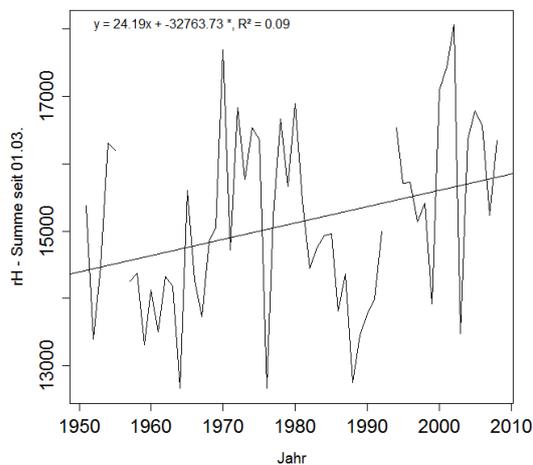


(a) Zeitreihe

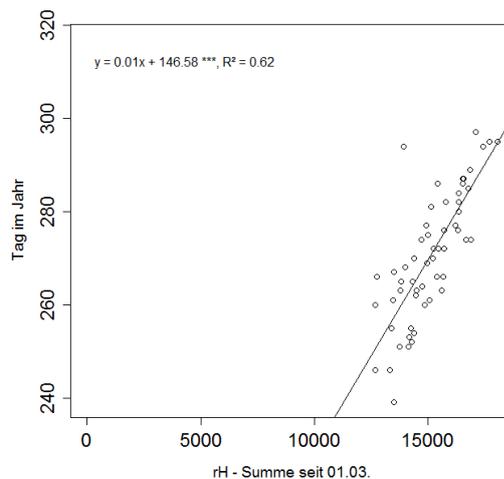


(b) Korrelationsschaubild

Abb. 5.3: Summe der minimalen Temperatur in 5 cm über dem Boden 50 Tage vor Eintreten der Phase In Abhängigkeit der Phase 'Stiel-Eiche - erste reife Früchte' (72).



(a) Zeitreihe



(b) Korrelationsschaubild

Abb. 5.4: Summe der relativen Luftfeuchtigkeit seit dem 01.03. in Abhängigkeit der Phase 'Stiel-Eiche - erste reife Früchte' (72).

Nun könnte man multiple lineare Regressionsmodelle oder andere Modelle, in welchem die Autokorrelation der klimatischen Daten beachtet wird aufstellen, die die Faktoren enthalten, die das höchste Bestimmtheitsmaß haben, um herauszufinden, welche Faktoren wie gewichtet auf das Eintreten der Phase von Interesse wirken. Hier soll allerdings

lediglich ein Blick auf die Zeitreihen der Klimamaße geworfen werden um abzuschätzen, ob sich ein Zusammenhang ergibt.

Aus physiologischer Sicht würde es Sinn ergeben, dass sowohl die relative Luftfeuchtigkeit als Regulativ für das Transpirationspotential, als auch die Temperatur als Regulativ für die Ablaufgeschwindigkeit chemischer Reaktionen eine physiologische Rolle spielen. Die Lufttemperatur in 5 cm über dem Boden könnte indirekt über die kurzfristig wirkende Bodentemperatur auf die Wurzeln einwirken und so die Verlagerung von Assimilaten und Nährsalzen von der Wurzel in die Frucht regulieren. Die Bodentemperatur zeigt bei der Summe 10 Tage vor Eintreten der Phase ein Bestimmtheitsmaß von 0.53. APOSTOL U. A. (2007) konnten zeigen, dass eine niedrige Bodentemperatur keinen Effekt auf das Öffnen der Knospen oder das Wasserpotential der Stiel-Eiche hat, das wohl aber die Wurzellänge, die Anzahl neuer Wurzeln und die Blattoberfläche unter dem Regime niedriger Temperaturen niedrig sind. Wohl wurden diese Experimente an einjährigen Pflanzen durchgeführt. Trotzdem sind auch alte Stiel-Eichen darauf angewiesen ständig neue Nährstoffe zu erschließen. Damit könnten sich diese Effekte auch bei älteren Stiel-Eichen bemerkbar machen, wenn die vielen kleinen Wurzeln beeinträchtigt werden. Eine geringe Blattoberfläche könnte dann verantwortlich für den Ablauf der Fruchtreife verantwortlich sein.

Die Summe der Lufttemperatur in 2 m über dem Boden kann, wie alle anderen klimatischen Faktoren einen Einfluss auf die Blattentwicklung und damit die Fruchtentwicklung der Stiel-Eiche haben BEQUET U. A. (2011). Die relative Luftfeuchtigkeit könnte - als Regulativ der Transpiration - bestimmen, wie viel Wasser aus den unteren Bereichen der Pflanze in die oberen Bereiche der Pflanze transportiert würde. Die Temperatur in 2 m über dem Boden wäre ein Maß für die Ablaufgeschwindigkeit der Prozesse in dieser Höhe. Aus den phänologischen und klimatischen Daten lässt sich diese Theorie allerdings nicht verifizieren. Es müssten Daten zum Transport von Assimilaten zur Frucht und eventuellen Temperatureinflüssen auf Phytohormone, die diesen Transport steuern könnten, untersucht werden.

Die Summen als Klimamaße sind jedenfalls insofern sinnvoll, als dass die Kombination der klimatischen Variablen über die Summen direkt bedingt, wie viele der Assimilate produziert werden. Die Mittelwerte als Klimamaße enthalten die Variation über die berechneten Tage nicht. Sie beschreiben eben auch nicht die stattgefundene Realität, in der bei einer gegebenen Temperatur, einem gegebenen CO_2 -Wert und einer gegebenen relativen Luftfeuchtigkeit pro Zeiteinheit eine davon abhängige Menge an Assimilaten produziert wird. Bei Anwendung von Mittelwerten wird lediglich die mittlere Assimilatproduktion multipliziert mit den Zeitschritten veranschlagt. Dieser Wert muss nicht mit dem Wert der tatsächlichen Summe übereinstimmen.

Die Anwendung von Mittelwerten in statistischen Arbeiten, in welchen mit schief verteilten Daten gearbeitet wird, ist immer problematisch. Phänologische Daten sind aufgrund ihrer Abhängigkeit von klimatischen Variablen einem Klimawandelszenario unterworfen. Je mehr Extremdaten zu einer Zeitreihe hinzukommen, desto schief gestaltet sich die Verteilung der Daten. Da das Hinzukommen von Extremwerten in einem Klimawandelszenario systembedingt ist, muss angenommen werden, dass phänologische Daten schief verteilt sind. Damit muss neu evaluiert werden, ob der Mittelwert als Mittelmaß noch dienlich ist oder nicht durch den Median oder andere Mittelmaße ersetzt werden sollte. Um dies zu prüfen wurde die **phänologische Uhr** mit einer Möglichkeit ausgestattet dies zu testen. Auch die **Häufigkeitsanalyse** liefert den Mittelwert und den Median einer Zeitreihe.

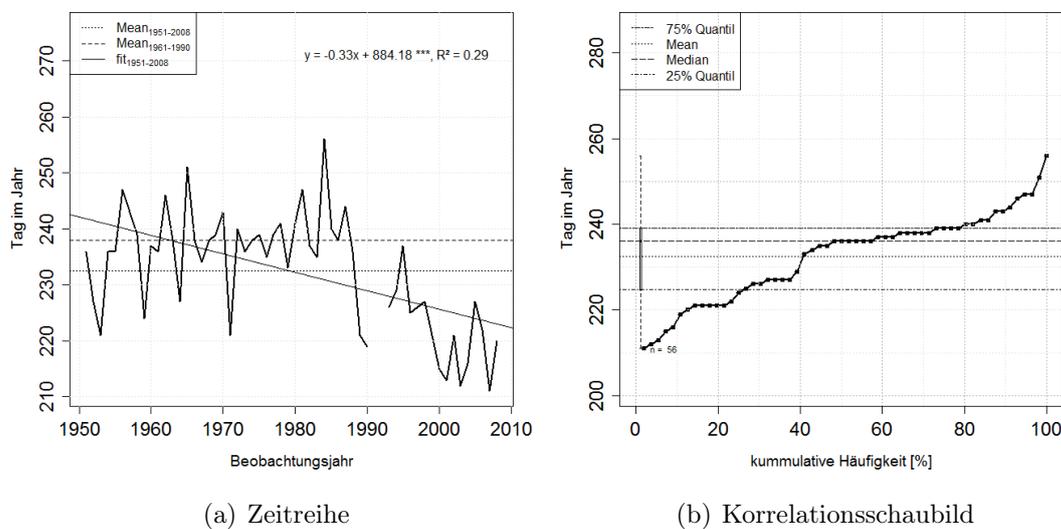
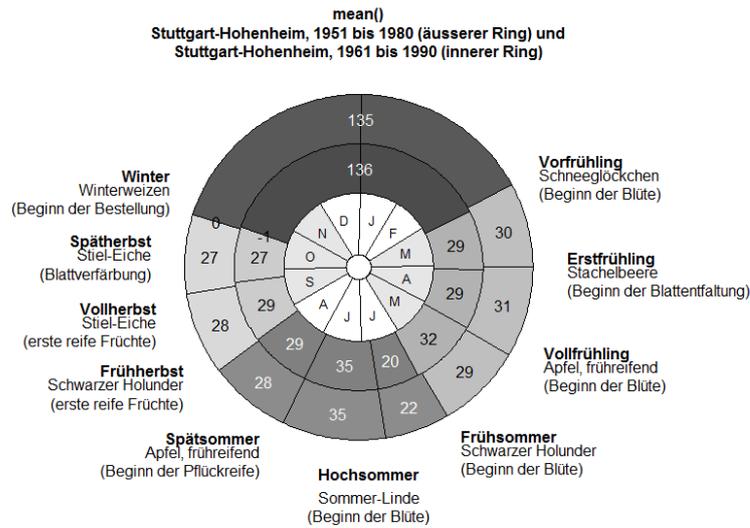


Abb. 5.5: 'Schwarzer Holunder - erste reife Früchte' (67) Dargestellt sind Zeitreihe und die Häufigkeitsanalyse. Hier soll ein detaillierter Blick auf die verzerrte Phase 67 geliefert werden, die auch über den Zeitraum 1951 bis 2008 starke Abweichungen zwischen arithmetischem Mittel und Median aufweist.

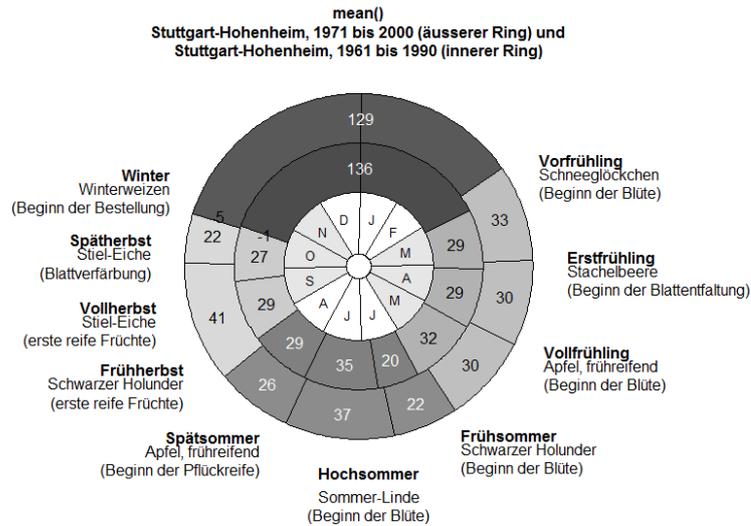
Die Abb. 4.8 bis Abb. 4.10 zeigen, dass durchaus unterschiedliche Effekte auftreten, wenn man die phänologische Uhr mit dem Mittelwert oder dem Median berechnet. Ein Blick in Tab. 8.8 zeigt, dass sich der Median und der Mittelwert des Frühherbstes mit der Phase 67 (Schwarzer Holunder - erste reife Früchte) um 4 Tage unterscheiden. Es kann daher vermutet werden, dass der niedrigere Mittelwert durch einige Extremwerte nach unten verzerrt wird. Abb. 5.4 bestätigt dies.



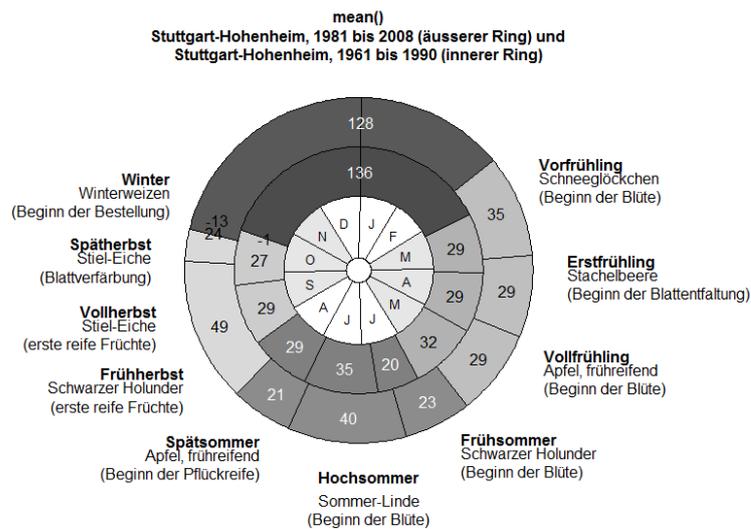
(a) 1951 bis 1980

Abb. 5.6: Phänologische Uhr der Station Hohenheim, Vergleich dreier Perioden mit der Referenzperiode 1961 bis 1990 um Entwicklungen über die Zeit zu visualisieren (I).

Abb. 5.6 und Abb. 5.7 zeigen drei sich überschneidende 30-jährige (arithmetische) Mittel der phänologischen Uhr. Der Trend der verschiedenen phänologischen Jahreszeiten zeigt sich deutlich. So kann man beispielsweise sehen, dass sich die Frühlings- und frühen Sommerphasen stetig zu früheren Eintrittsdaten bewegen. Der Spätsommer scheint sich lediglich sehr schwach zu entwickeln, während der Frühherbst etwas schneller zu früheren Eintrittsdaten tendiert. Der Vollherbst entwickelt sich dagegen mit wesentlich größerer Geschwindigkeit (Tage pro Zeitraum) zu späteren Eintrittsdaten. Mit beinahe gleicher Geschwindigkeit entwickelt sich der Spätherbst zu späteren Eintrittsdaten. Der Eintritt des Winters verschiebt sich kaum, wodurch der Spätherbst komplett dahinter verschwindet. Außerdem fällt auf, dass sich im Zeitraum 1961 bis 1990 kaum eine Veränderung im Vergleich zum Zeitraum 1951 bis 1980 ergeben hat. Erst im Zeitraum 1971 bis 2000 ergibt sich ein deutlicher Unterschied. Dies wird darauf zurückzuführen sein, dass sich der Trend beinahe aller Zeitreihen um das Jahr 1985 stark ändert. Damit schlägt sich diese Trendänderung bereits in dieser Periode nieder. Besonders interessant ist festzustellen, dass sich dieser Effekt allerdings nicht durch die erst seit 1985 verspäteten Herbstphasen, sondern durch eine drastische Verspätung der Fruchtreife in den ersten Jahren der 1970er Jahre ergibt. Dies könnte durch eine Kombination aus geringem Niederschlag, langer Sonnenscheindauer und niedrigen Temperaturen (eventuell relativ wolkenfreier Himmel) hervorgerufen worden sein.



(a) 1971 bis 2000



(b) 1981 bis 2008

Abb. 5.7: Phänologische Uhr der Station Hohenheim, Vergleich dreier Perioden mit der Referenzperiode 1961 bis 1990 um Entwicklungen über die Zeit zu visualisieren (II).

Der **phänologische Kalender** in Abb. 4.11 zeigt deutlich, dass die Leit- und die Ersatzphasen am Standort Hohenheim nicht zum selben Zeitpunkt eintreten. Der phänologische Kalender zeigt die Auswirkungen des sich verändernden Klimas auf deutliche Weise, da phänologische Phasen aller phänologischen Jahreszeiten repräsentiert sind. Man kann jedenfalls festhalten, dass phänologische Jahreszeiten mittlerweile lediglich etwas über die sie anzeigende Phase aussagen. Die damit korrelierten Phasen scheinen sich mannigfaltig zu entwickeln.

Betrachtet man die Korrelationstabellen einiger unterschiedlicher Phasen, erhärtet sich der Verdacht, dass das komplexe Zusammenspiel der klimatischen Faktoren sich auf jede der vom DWD beobachteten Pflanzen unterschiedlich auswirkt. Die Lufttemperaturen in 2 m über dem Boden sind den Effekten in der Atmosphäre stärker ausgesetzt und zeigen damit die Trends des Klimawandels stärker. Die Lufttemperaturen in 5 cm über dem Boden repräsentieren dagegen Werte, die durch das Mikroklima der Vegetation stark beeinflusst sind. Hier zeigen sich die Trends, die in 2 m über dem Boden präsent sind, kaum. Andere klimatische Faktoren wie die Sonnenscheindauer oder die relative Luftfeuchtigkeit scheinen laut der Korrelationstabelle einen großen Einfluss auf die physiologischen Entwicklungen zu haben. Da sich in diesen Faktoren allerdings keine großen Trends befinden, sind diese Faktoren für eine Veränderung der Phänologie eher zweitrangig. Erst dann, wenn sich die Gewichtung einer dieser sich nicht im Trend verändernden Faktoren durch die Trendentwicklung eines anderen Faktors wie der Temperatur ändert, können diese ins Gewicht fallen. Dies bleibt nach wie vor zu evaluieren. Damit sind alle Pflanzen, die hauptsächlich durch das bodennahe Klima beeinflusst werden, anderen Einflüssen ausgesetzt, als Pflanzen, die von der Temperatur in 5 cm über dem Boden kaum beeinflusst werden. Es kann allerdings genauso gut vorkommen, dass sich klimatische Effekte auf eine Pflanze über die Wurzeln auswirken, während die Pflanze gleichzeitig durch Lufttemperaturen in 2 m über dem Boden beeinflusst wird. Die Blüte des Huflattich wird beispielsweise hauptsächlich durch die relative Luftfeuchtigkeit (Summe seit 01.03. und 01.02., $R^2 = 0.97$), die Sonnenscheindauer (Summe seit 01.03., $R^2 = 0.81$) und durch die Lufttemperatur in 5 cm über dem Boden (Summe seit 01.02., $R^2 = 0.62$) beeinflusst. Da sich alle dieser Faktoren im betrachteten Zeitraum kaum verändert haben, hat sich die Phänologie des Huflattich ebenfalls kaum verändert.

5.2 Fehlerdiskussion

In jeder wissenschaftlichen Arbeit sind gewisse Fehlerquellen enthalten. Die Diskussion dieser Fehlerquellen und auch der Methodik hilft, den wissenschaftlichen Fortschritt aufrecht zu erhalten und ein Bewusstsein dafür zu gewinnen, in welchem Rahmen die Ergebnisse interpretierbar und anwendbar sind.

Potentielle Fehlerquellen liegen in jedem Teilschritt und können nur mehr oder weniger gut ausgeschlossen werden. Dabei liegt die größte potentielle Fehlerquelle schon am Anfang des gesamten Prozesses, bei der **Datensammlung**. Nur ein kleiner Teil der Beobachter ist beruflich unterwegs und kann daher die professionellen Voraussetzungen

mitbringen, die gewünscht wären. Ein Vorwissen ist zwar laut Leitfaden des DWD nicht als Voraussetzung an die Beobachter gestellt, hilft aber beim Auswählen der beobachteten Pflanzen. Hält man sich strikt an die Richtlinien, könnten trotzdem Fehler begangen werden, derer man sich nicht bewusst ist, weil man sich zu sehr auf die beschriebenen Dinge konzentriert und Banales vielleicht aus dem Sinn verliert. Nicht nur die Beurteilung der Eignung der beobachteten Pflanzen wird damit mit unterschiedlichem Niveau vorgenommen, auch die Beobachtung selbst ist einem unterschiedlichen Niveau unterworfen. Selbst unterschiedliche Menschen, die alle von ein und demselben Lehrer geschult wurden, erzielen bei Beobachtungen und Kartierungen unterschiedliche Ergebnisse.

Neben diesen menschlichen Fehlerquellen können sich am Standort der Beobachtung auch Fehlerquellen anderer Art einschleichen, die die **Datengrundlage** in Frage stellen. Im Beobachtungsprogramm des DWD werden keine genetischen Klone beobachtet, sondern lediglich die entsprechenden Arten. Aufgrund von Hybridbildung und genetischer Rekombination können hier also Genotypen beobachtet werden, die unterschiedlich sind und leicht unterschiedlich, an den Standort angepasst, reagieren. Auch können die Pflanzen nicht-genetischen Effekten wie Krankheitsbefall oder mikroklimatischen Effekten unterworfen sein, die nicht (sofort) erkannt werden.

Beim Erheben, Übermitteln und Übertragen der Daten können weitere Fehler auftreten, wenn Zahlendreher auftauchen, Zahlen nicht erkannt und falsch abgeschrieben werden oder sonstige Missverständnisse auftreten. Zahlendreher und andere unwahrscheinliche Zahlenwerte werden mit der bereits beschriebenen Methode vom DWD korrigiert. Im zweistelligen Bereich weichen Zahlendreher allerdings oft nicht wirklich voneinander ab und über eine Auftrittswahrscheinlichkeit kann nicht ermittelt werden ob nun 12 oder 21 gemeint war. Diese Zahlen liegen nahe beisammen und fallen daher eventuell nicht als unwahrscheinlich auf.

Eine nicht zu unterschätzende Fehlerquelle ist die **Verwaltung** der großen Datenmengen. Große Datenmengen können in großen Dateien gespeichert werden und sind dann eventuell schwierig zu referenzieren, da jedesmal, wenn nur ein Teil der Daten untersucht werden soll, die gesamte Datenmenge durchsucht werden muss. Dies kann sehr rechen- und zeitaufwändig sein, minimiert aber Fehler, die beim Umbenennen und Verschieben von kleinen Einzeldateien auftreten können. Viele kleine Dateien ermöglichen hingegen eine leichte Referenzierung einzelner weniger Teile der Daten.

Auch in der (statistischen) **Be- und Verarbeitung** können sich Übertragungsfehler einschleichen. Hier können zusätzlich Fehler gefunden werden, die auf mangelndes Verständnis der Materie zurückzuführen sind. Die immer komplexer werdenden Computerprogramme sollten vom Wissenschaftler gänzlich verstanden werden um Fehlerquellen ausschließen zu können. Unbekannte Prozesse in Programmen können sogar zu sehr großen Fehlern führen, wenn ein Computeroutput falsch interpretiert oder verstanden wird oder falsche statistische Routinen angewandt werden und die Ergebnisse dieser Routine dann nichts zu der Fragestellung beitragen. Auch bei eigentlich richtiger An-

wendung statistischer Software und ordentlicher Erstellung von Schaubildern, können die (richtigen) Ergebnisse und Schaubilder falsch interpretiert werden.

Auch erkenntnistheoretische Probleme könnten hier angeführt werden. Aufgrund des Umfangs dieses Themenkomplexes soll hier allerdings nicht darauf eingegangen werden.

5.3 Methodendiskussion

Mit modernen Statistikpaketen können viele Probleme am Computer innerhalb kurzer Zeit abgehandelt werden. Allerdings muss dabei immer diskutiert werden, in welchem Rahmen die angewandten Methoden tatsächlich anwendbar sind und wo deren Grenzen sind. Die **phänologische Uhr** ist eine nicht ganz unproblematische Form phänologische Daten darzustellen. Wie weiter oben bereits diskutiert wurde, ist der Mittelwert zur Ermittlung des Mittelmaßes bei der existenten Entwicklung des Klimas nicht mehr angemessen. Auch ist die Vergleichbarkeit der beiden Ringe fragwürdig. Die visuellen Informationen sind quasi nicht normalisiert, wodurch man den Betrag der Werte nur schwer ablesen kann. In Abb. 4.6 zeigt die phänologische Jahreszeit Frühherbst dies gut. Der Wert des Zeitraumes 1981 bis 2008 zeigt 49, der des Zeitraumes 1951 bis 1980 zeigt 28. Damit ist der Wert des später liegenden Zeitraums wesentlich größer. So wird der Wert von 49 im Vergleich zum Wert von 28 visuell unterschätzt. Genau so würde der Wert visuell überschätzt, würde man die beiden Zeiträume tauschen. Die Tatsache, dass lediglich die Dauer und nicht das Eintrittsdatum der phänologischen Jahreszeiten abgebildet ist, ist ebenfalls ein Manko, dass die möglichen Nutzungen der phänologischen Uhr einschränkt. Auch lassen sich diese Daten nicht berechnen, da die phänologische Uhr nirgends einen Nullpunkt hat. Für kürzere Zeiträume können die Aussagen phänologischer Uhren besser interpretiert werden, da die Mittelung nicht so sehr ausnivelliert wird HENNIGES U. A. (2005).

Bei der **Autokorrelationsfunktion** ist es nicht sinnvoll Zeitreihen zu analysieren, die nicht vollständig vorliegen beziehungsweise viele nicht verfügbare Werte enthalten. Nicht verfügbare Werte können von der Autokorrelationsfunktion in R zwar so behandelt werden, als ob sie nicht existierten, dabei wird dann aber die Autokorrelation für nicht gleichmäßige Intervalle berechnet und man kann in diesem Kontext keine sinnvollen Interpretationen davon ableiten. Wenn eine Zeitreihe für vier hintereinander folgende Jahren nicht verfügbare Werte hat, diese bei der Berechnung ausgelassen werden, also die Zeitreihe bei der Verschiebung 1 um 5 Jahre verschoben wird und eine gewisse Korrelation festgestellt wird, steht diese in keinem Kontext. Da man nicht weiß, was in den vier Jahren dazwischen passiert ist, bringt dieser Korrelationswert keinen Wissenszugewinn. Wären diese vier Werte vorhanden und in der ACF könnte ein Trend der Korrelationen festgestellt werden, könnte dieses Wissen dazu dienen, weitere Tests auf die Hintergründe dieser Autokorrelation anzupassen und anzuwenden. Läge in diesen vier Autokorrelationen allerdings kein Trend sondern lediglich Rauschen, wüsste man nur, dass keine Autokorrelation vorliegt. Trotzdem kann man beispielsweise Zeitreihen mit nur einem einzelnen oder zwei einzelnen nicht verfügbaren Werten in der ACF anschauen, da diese

zwar eingeschränkte, aber dennoch interpretierbare Ergebnisse liefern.

Das **Bestimmtheitsmaß**, wie auch die **Korrelation**, haben nicht sehr viel Aussagekraft, wenn sie über einen großen Zeitraum berechnet werden, in welchem viel Fluktuation in den Daten liegt. Letztlich wird ein Trend beschrieben, der sich über die gesamte Zeitreihe erstreckt. Damit ist es allerdings nicht möglich vorauszusagen, wie sich die Werte weiterhin entwickeln werden. Auch kann mit einem Bestimmtheitsmaß über den Gesamtzeitraum keine Aussage über kleinere Zeiträume gemacht werden, da das Bestimmtheitsmaß nicht quantifiziert, wie sich die Daten in Abhängigkeit der Zeit entwickeln. Das Bestimmtheitsmaß kann also eine gute Annäherung an die Daten suggerieren, die nicht gegeben ist.

Damit steht fest, dass ein hoher Wert des Bestimmtheitsmaßes nur bedingt aussagt, dass ein linearer Zusammenhang besteht. Ein niedriger Wert dagegen sagt aus, dass kein linearer Zusammenhang besteht, jedoch nicht, dass kein Zusammenhang besteht.

Ein wichtiger Punkt für das Verständnis des Bestimmtheitsmaßes liegt in der Frage, ob die erklärende Variable tatsächlich die Variable ist, die die erklärte Variable am besten beschreibt oder ob die beiden Variablen lediglich von einer dritten Variablen abhängen und in ähnlicher Weise beeinflusst werden.

Die Trendanalyse über die Anpassung einer **linearen Regression** zeigt zwar einen gewissen Wert, wie beim Bestimmtheitsmaß darf dies aber nicht überinterpretiert werden. Bei den Veränderungen im Trend kann es sich unter Umständen um einen Effekt der Saisonalität handeln, den man bisher nur deswegen noch nicht abschätzen kann, weil eine Periode dieser Saison noch nicht beendet ist.

Im irregulären Teil der Komponentenerlegung sind keine systematischen Effekte mehr enthalten. Allerdings können diese unregelmäßigen Schwankungen durch höhergradige deterministische (pflanzenphysiologische) Zusammenhänge zustande kommen. Gerade bei Pflanzen in einer komplexen Umwelt wirken viele sich ständig ändernde Faktoren ein. Selbst bei nur $n = 3$ einwirkenden Faktoren (Temperatur, Sonnenscheindauer und Niederschlag) sind schon $2^3 = 8$ verschiedene Kombinationen gegeben. Diese Faktoren sind allerdings keine logischen Faktoren mit den Werten „Wahr“ oder „Falsch“, sondern beeinflussen die Pflanze je nach Qualität und Zusammenspiel mit den anderen Faktoren. Würden nur drei Ausprägungen für jeden der 3 Faktoren existieren, würden schon $3^3 = 27$ Kombinationen möglicher deterministischer Faktoren existieren. Da Klimadaten allerdings nicht diskret, sondern kontinuierlich sind und nicht nur diese drei Faktoren auf die Physiologie und damit die Phänologie einer Pflanze einwirken, existieren wesentlich mehr als 27 mögliche Kombinationen (sowohl Basis, als auch Exponent können höhere Werte annehmen). Da die Komponentenerlegung allerdings nicht ermitteln kann, ob der irreguläre Teil lediglich auf weißem Rauschen basiert oder ob einzelne der darin repräsentierten Abweichungen auf tatsächlichen realen Einwirkungen beruhen, ist die Komponentenerlegung zur Untersuchung von Ursache-Wirkung-Beziehungen nicht geeignet. In der Funktion, die in R zur Anwendung kommt, ist es daneben nicht möglich eine Saisonalität zweiter Ordnung (Zyklus) darzustellen.

Die **Korrelationsanalyse** die in dieser Arbeit verwendet wird basiert auf dem Bestimmtheitsmaß und dem p-Wert des `cor.test()`s. Damit gelten die oben beschriebenen Einschränkungen bezüglich des Bestimmtheitsmaßes. Zu Beginn dieses Kapitels wurde schon beschrieben, dass die Pearsonsche Korrelation bei diesen Daten eventuell nicht das beste Maß ist. Dementsprechend muss eine Zeitreihe immer kritisch in Bezug auf die Verteilung betrachtet werden, bevor sie in statistische Interpretationen einfließt.

6 Ausblick

Für diese Arbeit wurden viele Funktionen geschrieben in welchen ein großes Potential über diese Arbeit hinaus steckt. Viele der Funktionen könnten daher weiterentwickelt und eventuell als R-Paket veröffentlicht werden. So wäre es möglich, dass phänologische Daten anderer Standorte mit den selben Routinen berechnet werden und eine optimale Vergleichbarkeit gewährleistet ist. Neben dieser Möglichkeit könnten Funktionen wie die der Korrelationsanalyse derart erweitert werden, dass die Bestimmtheitsmaße die nur sehr unwahrscheinlich zutreffen entweder aus der Tabelle entfernt werden oder im besten Fall mit Farben markiert werden. So ließe sich der Blick schnell auf das Wesentliche lenken und Besonderheiten könnten trotzdem bei genauerem Hinschauen entdeckt werden. Außerdem müsste die Korrelationsanalyse mit vielen weiteren Klimamaßen erweitert werden, sodass alle möglichen physiologischen Aspekte darin abgebildet werden könnten. Denkbar wären dabei besondere Tage, die bereits aus der Literatur bekannt sind. Daneben könnten multiple Regressionen an die Daten angepasst werden, um bei Vorliegen linearer Zusammenhänge ein höheres Bestimmtheitsmaß zu erhalten. Auch müsste die Literatur nach möglichen Transformationen für die Daten durchsucht werden.

Aufgrund der unterschiedlichen Gewichtung verschiedener klimatischer Faktoren auf die Phänologie verschiedener Arten könnte man überprüfen, wie sich diese unterschiedliche Gewichtung über einen langen Zeitraum auswirkt. Nimmt man an, dass zwei Arten phänologisch beobachtet werden und aus der Beobachtung die Vegetationszeit berechnet wird, kann man darstellen, welche der beiden Arten durch ein sich änderndes Klima bevorzugt wird und welche benachteiligt wird. Auch könnte man Phasen, die in der Phänologie erhoben werden, darauf hin untersuchen, wie sie verwendet werden könnten, um die Konkurrenzkraft einer Art zu untersuchen, beispielsweise der Zeitpunkt, zu dem die generative Vermehrung stattfindet, der vielleicht in irgend einer Art selektiv wirkt. Hierzu wäre allerdings eine wesentlich höhere Datendichte und ein länger erfasster Zeitraum von Nöten. Über Prognosen der klimatischen Faktoren könnte man zumindest großklimatisch und großräumig errechnen, wie sich Konkurrenzsituationen verschieben. Hier kann man beispielsweise an die Buche denken und die Frage stellen, ob die Dominanz der Buche in Mitteleuropa auch weiterhin durch klimatische Faktoren gestützt wird oder ob sich die Umstände während und nach dem Klimawandel so verändern, dass sich beispielsweise Eichenwälder oder gar Koniferenwälder etablieren. Dies würde sich sicherlich über einen sehr langen Zeitraum von mehreren hundert Jahren auswirken könnte aber für die Forstwirtschaft schon heute wichtiges Wissen sein. Falsch angepflanzte Bäume degradieren in großen Beständen schon heute die Landschaft, wie man das bei Fichtenforsten sieht. Koppelt man diese Analysen mit Geographischen-Informationen-Systemen, könnten Karten erstellt werden, die darstellen wo welcher Forst oder wo welche landwirtschaftliche Kultur bevorzugt angepflanzt werden soll.

Eine Idee, die während der Literatur-Recherche aufkam, wäre, alle möglichen bisherigen Modelle zur Phänologie mit den doch recht kompletten und weit zurückreichenden Daten von Hohenheim durchzurechnen und zu evaluieren. Hierauf aufbauend könnte weitere Forschung und Entwicklung an den Modellen getätigt werden. So könnten auch andere Faktoren wie die Stadtentwicklung um Hohenheim herum und der Flughafen in Filderstadt (über die Fluggastzahlen oder die Flugzeugzahlen) mit in Modelle genommen werden um zu evaluieren welchen Effekt diese haben.

Im größeren Maßstab könnte untersucht werden, welchen Einfluss die Sonnenfleckenaktivität am Standort Hohenheim aufweist. Hier müsste die Frage beantwortet werden, ob Sonnenflecken einen signifikanten Einfluss auf das Klima beziehungsweise die phänologischen Erscheinungen direkt haben und ob sich diese Saisonalität in den klimatischen und phänologischen Daten wiederfindet. Auch wäre es interessant zu überprüfen, ob und wie großklimatische Prozesse wie die Nordatlantische Oszillation (NAO) sich in Hohenheim auswirken und welche Gewichtung mikroklimatische Effekte im Vergleich zur NAO aufweisen. Die NAO ist zwar die treibende großklimatische Kraft in Europa, jedoch könnten landschaftliche Begebenheiten ebenfalls in großem Ausmaß verantwortlich für die klimatische Situation an einem Standort sein. Eine gewisse erklärende Varianz der NAO auf phänologische Phasen kann durch landschaftlich determinierte Faktoren maskiert sein, wie zum Beispiel die Temperaturabhängigkeit der phänologischen Eintrittsdaten durch andere mit der Temperatur korrelierte Faktoren (das Klima der Kessellage Stuttgarts, der Hänge der Schwäbischen Alb, des Neckarursprungs oder des Bodensees können hier als Beispiele angeführt werden).

7 Danksagung

Ich möchte mich bedanken bei allen, die mir bei der Erstellung dieser Diplomarbeit behilflich waren, oder dies möglich gemacht haben. Da ist an erster Stelle mein Betreuer Dr. Ingo Holz zu nennen, der mich mit dem Thema in Berührung gebracht hat. Immer wenn meinerseits Fragen aufkamen konnte er mich mit konstruktiven Denkanstößen auf einen sinnvollen Weg bringen.

Auch sei dem Deutschen Wetterdienst gedankt, der eine solch umfangreiche Sammlung phänologischer Daten für Deutschland tätigt und unterhält. Insbesondere sei Herrn Ekko Bruns gedankt, der mir freundlicherweise die Benutzeranleitung zum Sammeln phänologischer Daten kostenfrei zur Verfügung gestellt und mich mit dem Angebot einen Report meiner Arbeit im Phäno-Journal zu veröffentlichen ungemein motiviert hat.

Ebenso gilt Dank dem verantwortlichen Professor Dr. rer. nat. Reinhard Böcker der sich trotz Ruhestand noch die Zeit nimmt auf studentische Belange einzugehen und mich mit seiner Begeisterung zu Landschaft und Botanik maßgeblich beeinflusst hat. Auch Prof. Dr. Hans-Peter Piepho gebührt Dank für seinen verständlichen Unterricht der Statistik, ohne den ich die sich hier stellenden Aufgaben nicht hätte bewältigen können.

Außerdem möchte ich all jenen in meinem persönlichen Umfeld danken, die diese Arbeit gegengelesen haben und Korrekturvorschläge eingebracht haben.

8 Anhang

Tab. 8.1: Artenliste aller phänologisch beobachteten Pflanzenarten (Wildpflanzen) beim DWD.

Pflanzenname	Wissenschaftlicher Name	Pflanzenfamilie
Beifuß	<i>Artemisia vulgaris</i> L.	Asteraceae
Busch-Windröschen	<i>Anemone nemorosa</i> L.	Ranunculaceae
Eberesche	<i>Sorbus aucuparia</i> L.	Rosaceae
Esche	<i>Fraxinus excelsior</i> L.	Oleaceae
Europäische Lärche	<i>Larix decidua</i> MILL.	Pinaceae
Falscher Jasmin	<i>Philadelphus coronarius</i> L.	Hydrangeaceae
Fichte	<i>Picea abies</i> H.KARST.	Pinaceae
Flieder	<i>Syringa vulgaris</i> L.	Oleaceae
Forsythie	<i>Forsythia suspensa</i> THUNB.	Oleaceae
Goldregen	<i>Laburnum anagyroides</i> FABR.	Fabaceae
Hänge-Birke	<i>Betula pendula</i> ROTH.	Betulaceae
Hasel	<i>Corylus avellana</i> L.	Betulaceae
Heidekraut	<i>Calluna vulgaris</i> HULL	Ericaceae
Herbstzeitlose	<i>Colchicum autumnale</i> L.	Colchicaceae
Huflattich	<i>Tussilago farfara</i> L.	Asteraceae
Hunds-Rose	<i>Rosa canina</i> L.	Rosaceae
Kiefer	<i>Pinus sylvestris</i> L.	Pinaceae
Kornelkirsche	<i>Cornus mas</i> L.	Cornaceae
Löwenzahn	<i>Taraxacum officinale</i> WIGGERS	Asteraceae
Robinie	<i>Robinia pseudoacacia</i> L.	Fabaceae
Roskastanie	<i>Aesculus hippocastanum</i> L.	Sapindaceae
Rotbuche	<i>Fagus sylvatica</i> L.	Fagaceae
Sal-Weide	<i>Salix caprea</i> L.	Salicaceae
Schlehe	<i>Prunus spinosa</i> L.	Rosaceae
Schneebeere	<i>Symphoricarpos albus</i> S.F.BLAKE	Caprifoliaceae
Schneeglöckchen	<i>Galanthus nivalis</i> L.	Amaryllidaceae
Schwarz-Erle	<i>Alnus glutinosa</i> GAERTN.	Betulaceae
Schwarzer Holunder	<i>Sambucus nigra</i> L.	Adoxaceae
Sommer-Linde	<i>Tilia platyphyllos</i> SCOP.	Adoxaceae
Spitz-Ahorn	<i>Acer platanoides</i> L.	Sapindaceae
Stiel-Eiche	<i>Quercus robur</i> L.	Fagaceae
Tanne	<i>Abies</i> sp.	Pinaceae

Traubenkirsche	<i>Prunus padus</i> L.	Rosaceae
Wiesen-Fuchsschwanz	<i>Alopecurus pratensis</i> L.	Poaceae
Wiesen-Knäuelgras	<i>Dactylis glomerata</i> L.	Poaceae
Winter-Linde	<i>Tilia cordata</i> P.MILL.	Malvaceae
Zweigriffliger Weißdorn	<i>Crataegus laevigata</i> DC.	Rosaceae

Tab. 8.2: Liste phänologischer Jahreszeiten mit ihren Leit- und Ersatzphasen. Kennziffern der Phasen, siehe Tab. 8.3

phän. Jahreszeit	Leitphase	Ersatzphase
Vorfrühling	Hasel - Blüte	Schneeglöckchen - Blüte
Erstfrühling	Forsythie - Blüte	Stachelbeere - Blattentfaltung
Vollfrühling	Apfel, frühreifende - Blüte	Stiel-Eiche - Blattentfaltung
Frühsommer	Schwarzer Holunder - Blüte	Robinie - Blüte
Hochsommer	Sommer-Linde - Blüte	Johannisbeere - Fruchtreife
Spätsommer	Apfel, frühreifend - Fruchtreife	Eberesche - Fruchtreife
Frühherbst	Schwarzer Holunder - Fruchtreife	Kornelkirsche - Fruchtreife
Vollherbst	Stiel-Eiche - Fruchtreife	Roskastanie - Fruchtreife
Spätherbst	Stiel-Eiche - Blattverfärbung	Eberesche - Blattfall
Winter	Stiel-Eiche - Blattfall	Apfel, spätreifend - Blattfall

Tab. 8.3: Übersicht über die phänologischen Phasen der Wildpflanzen des DWD (Stand 03.2011)

Nr.	Gruppe	Pflanze	Kennung
1	Wild	Hasel	Blüte
2	Wild	Schneeglöckchen	Blüte
3	Wild	Huflattich	Blüte
4	Wild	Sal-Weide	Blüte
5	Wild	Spitz-Ahorn	Blüte
6	Wild	Forsythie	Blüte
7	Wild	Rosskastanie	Blattentfaltung
8	Wild	Rosskastanie	Blüte
9	Wild	Hänge-Birke	Blattentfaltung
10	Wild	Sommer-Linde	Blattentfaltung
11	Wild	Schlehe	Blüte
12	Wild	Rotbuche	Blattentfaltung
13	Wild	Stiel-Eiche	Blattentfaltung
14	Wild	Stiel-Eiche	Blüte
15	Wild	Flieder	Blüte
16	Wild	Zweigrieffeliger Weißdorn	Blüte
17	Wild	Fichte	Maitrieb
18	Wild	Schwarzer Holunder	Blüte
19	Wild	Wiesen-Fuchsschwanz	Vollblüte
20	Wild	Wiesen-Knäuelgras	Vollblüte
64	Wild	Sommer-Linde	Blüte
65	Wild	Heidekraut	Blüte
66	Wild	Herbstzeitlose	Blüte
67	Wild	Schwarzer Holunder	Fruchtreife
68	Wild	Rosskastanie	Fruchtreife
69	Wild	Rosskastanie	Blattverfärbung
70	Wild	Rotbuche	Fruchtreife
71	Wild	Rotbuche	Blattverfärbung
72	Wild	Stiel-Eiche	Fruchtreife
73	Wild	Stiel-Eiche	Blattverfärbung
74	Wild	Hänge-Birke	Blattverfärbung
112	Wild	Schwarz-Erle	Blüte
113	Wild	Schwarz-Erle	Blattentfaltung
114	Wild	Kornelkirsche	Blüte
115	Wild	Busch-Windröschen	Blüte
116	Wild	Löwenzahn	Blüte
117	Wild	Europäische Lärche	Nadelentfaltung
118	Wild	Europäische Lärche	Blüte
119	Wild	Esche	Blüte

120	Wild	Esche	Blattentfaltung
121	Wild	Winter-Linde	Blattentfaltung
122	Wild	Robinie	Blattentfaltung
123	Wild	Robinie	Blüte
124	Wild	Rotbuche	Blüte
125	Wild	Fichte	Blüte
126	Wild	Tanne	Blüte
127	Wild	Tanne	Maitrieb
128	Wild	Kiefer	Blüte
129	Wild	Kiefer	Maitrieb
130	Wild	Traubenkirsche	Blüte
131	Wild	Eberesche	Blüte
132	Wild	Hunds-Rose	Blüte
133	Wild	Goldregen	Blüte
134	Wild	Falscher Jasmin	Blüte
135	Wild	Schneebeere	Blüte
175	Wild	Winter-Linde	Blüte
176	Wild	Stiel-Eiche	Johannistrieb
177	Wild	Hunds-Rose	Fruchtreife
178	Wild	Eberesche	Fruchtreife
213	Wild	Beifuß	Blüte
214	Wild	Eberesche	Austrieb
215	Wild	Eberesche	Blattentfaltung
216	Wild	Eberesche	Blattfall
217	Wild	Europäische Lärche	Nadelverfärbung
218	Wild	Europäische Lärche	Nadelfall
219	Wild	Hänge-Birke	Austrieb
220	Wild	Hänge-Birke	Blüte
221	Wild	Hänge-Birke	Blattfall
222	Wild	Kornelkirsche	Fruchtreife
223	Wild	Roskastanie	Austrieb
224	Wild	Roskastanie	Blattfall
225	Wild	Rotbuche	Blattfall
226	Wild	Stiel-Eiche	Blattfall
227	Wild	Wiesen-Fuchsschwanz	Blüte
228	Wild	Zweigriffeliger Weißdorn	Fruchtreife

Tab. 8.4: Autokorrelationswerte der klimatischen Variablen.

T_1 = maximale Temperatur 2 m über dem Boden [$^{\circ}C$], T_2 = minimale Temperatur 2 m über dem Boden [$^{\circ}C$], T_3 = mittlere Temperatur 2 m über dem Boden [$^{\circ}C$], T_4 = minimale Temperatur 5 cm über dem Boden [$^{\circ}C$], T_5 = mittlere Temperatur in 2 cm Tiefe [$^{\circ}C$], T_6 = mittlere Temperatur in 5 cm Tiefe [$^{\circ}C$], NS = Niederschlag [mm], rH = mittlere relative Luftfeuchtigkeit [%], sonne = Sonnenscheindauer [h], schnee = Schneehöhe [cm]

lag	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	NS	rH	sonne	schnee
0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1	0,80	0,80	0,81	0,79	0,83	0,83	0,18	0,61	0,66	0,35
2	0,46	0,47	0,47	0,46	0,48	0,49	0,09	0,36	0,37	0,052
3	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	-0,01	0,08	-0,00	-0,05
4	-0,45	-0,44	-0,45	-0,44	-0,46	-0,46	-0,12	-0,16	-0,38	-0,11
5	-0,77	-0,77	-0,78	-0,76	-0,80	-0,80	-0,13	-0,33	-0,63	-0,12
6	-0,89	-0,89	-0,90	-0,88	-0,92	-0,92	-0,18	-0,42	-0,74	-0,12
7	-0,77	-0,76	-0,77	-0,76	-0,79	-0,79	-0,13	-0,35	-0,64	-0,12
8	-0,44	-0,43	-0,44	-0,44	-0,45	-0,45	-0,10	-0,17	-0,37	-0,10
9	0,00	0,02	0,013	0,01	0,01	0,02	0,00	0,04	0,01	-0,07
10	0,45	0,46	0,46	0,45	0,478	0,48	0,06	0,30	0,36	0,04
11	0,79	0,79	0,80	0,77	0,81	0,82	0,12	0,51	0,64	0,20
12	0,91	0,90	0,91	0,89	0,94	0,94	0,18	0,60	0,74	0,30

Tab. 8.5: Statistik des Shapiro-Wilk-Tests für die Normalverteilung der phänologischen Daten

Phase	W-Wert	p-Wert	Phase	W-Wert	p-Wert	Phase	W-Wert	p-Wert
1	0.9763	0.3241	69	0.9756	0.3020	132	0.9770	0.3461
2	0.9760	0.3023	70	0.9635	0.4202	133	0.9906	0.9830
3	0.9749	0.2822	71	0.9305	0.0025	134	0.9700	0.5203
4	0.9738	0.2421	72	0.9838	0.6512	135	0.9516	0.1176
5	0.9720	0.2080	73	0.9560	0.0345	175	0.9726	0.4498
6	0.9764	0.3372	74	0.9447	0.0105	176	0.9633	0.4834
7	0.9595	0.0507	112	0.9597	0.0587	177	0.9879	0.8589
8	0.9747	0.2665	113	0.9737	0.3631	178	0.9586	0.0636
9	0.9787	0.3979	114	0.9806	0.4998	213	0.9147	0.1042
10	0.9199	0.0077	115	0.9587	0.0497	214	0.9742	0.8720
11	0.9752	0.2801	116	0.9448	0.0106	215	0.8864	0.0335
12	0.9753	0.3035	117	0.9756	0.3138	216	0.9258	0.1635
13	0.9802	0.4950	118	0.9580	0.2938	217	0.9406	0.2967
14	0.9521	0.1124	119	0.9825	0.7114	218	0.9236	0.1495
15	0.9789	0.4056	120	0.9285	0.0029	219	0.9472	0.3832
16	0.9633	0.1368	121	0.9051	0.0031	220	0.9496	0.4184
17	0.9479	0.0146	122	0.9768	0.6381	221	0.9275	0.1754
18	0.9789	0.4056	123	0.9761	0.4163	222	0.9733	0.8569
19	0.9765	0.3182	124	0.9588	0.5197	223	0.9254	0.1610
20	0.9251	0.0017	125	0.9959	0.8777	224	0.9475	0.4187
64	0.9883	0.8570	127	0.9569	0.1609	225	0.9760	0.8993
65	0.9675	0.1278	128	0.9787	0.6566	226	0.9317	0.2082
66	0.9760	0.5429	129	0.9868	0.8609	227	0.9054	0.0714
67	0.9602	0.0622	130	0.9242	0.0564	228	0.8682	0.0166
68	0.9875	0.8135	131	0.9739	0.2852			

Tab. 8.6: Statistik des Shapiro-Wilk-Tests für die Normalverteilung der klimatischen Daten.

T_1 = maximale Temperatur 2 m über dem Boden [$^{\circ}C$], T_2 = minimale Temperatur 2 m über dem Boden [$^{\circ}C$], T_3 = mittlere Temperatur 2 m über dem Boden [$^{\circ}C$], T_4 = minimale Temperatur 5 cm über dem Boden [$^{\circ}C$], T_5 = mittlere Temperatur in 2 cm Tiefe [$^{\circ}C$], T_6 = mittlere Temperatur in 5 cm Tiefe [$^{\circ}C$], NS = Niederschlag [mm], rH = mittlere relative Luftfeuchtigkeit [%], sonne = Sonnenscheindauer [h], schnee = Schneehöhe [cm]

Variable	W-Wert	p-Wert
T_1	0.9578	3.015497*e-13
T_2	0.9635	3.820707*e-12
T_3	0.9615	1.514500*e-12
T_4	0.9632	3.327216*e-12
T_5	0.9366	1.732601*e-16
T_6	0.9348	2.325782*e-16
NS	0.9473	4.954250*e-15
rH	0.9266	6.194379*e-18
sonne	0.9662	1.364674*e-11
schnee	0.3938	5.100384*e-43

Tab. 8.7: Pearson'sche Korrelation zwischen den klimatischen Variablen.
Abkürzungen siehe Tab. 8.6

	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	NS	rH	sonne	schnee
T_1	1.00	0.89	0.98	0.81	0.94	0.93	0.05	-0.47	0.58	-0.38
T_2		1.00	0.94	0.96	0.91	0.91	0.15	-0.25	0.30	-0.41
T_3			1.00	0.87	0.95	0.95	0.07	-0.42	0.50	-0.39
T_4				1.00	0.85	0.86	0.19	-0.13	0.18	-0.40
T_5					1.00	1.00	0.08	-0.39	0.51	-0.32
T_6						1.00	0.09	-0.37	0.50	-0.32
NS							1.00	0.23	-0.20	-0.01
rH								1.00	-0.71	0.13
sonne									1.00	-0.14
schnee										1.00

Tab. 8.8: statistische Werte der Häufigkeitsanalyse.

Min = Minimumwert der Zeitreihe, 1st Qu. = erste Quantil (25 %), Mean = arithmetischer Mittelwert, 3rd Qu. = drittes Quantil (75 %), Max = Maximumwert der Zeitreihe, IQR = Interquartilabstand

Phase	Min	1st Qu.	Mean	Median	3rd Qu.	Max	Abstand	IQR	Anzahl
1	-27	29	42	39	62	84	111	33	18
2	20	45.25	57	57	69	87	67	23.75	18
3	48	62	71	70	80	103	55	18	18
4	46	63.5	74	74.5	84.75	98	52	21.25	18
5	78	94	102	103	110	120	42	16	18
6	54	74	85	84	96.5	112	58	22.5	18
7	87	98.25	105	107	111	122	35	12.75	18
8	108	119.25	126	126	132	140	32	12.75	18
9	86	99.25	106	108	112	124	38	12.75	18
10	93	109.75	113	115	119.25	131	38	9.5	18
11	74	93.25	104	106.5	114	128	54	20.75	18
12	101	115.75	118	118	121.5	132	31	5.75	18
13	106	118.5	123	123	127	136	30	8.5	18
14	107	127	130	132	136	142	35	9	18
15	103	114.5	122	122	128	139	36	13.5	18
16	107	122.75	130	129.5	138.25	146	39	15.5	18
17	94	117	121	122	125.75	142	48	8.75	18
18	120	139	148	149	156.75	169	49	17.75	18
19	111	124	132	132.5	139.75	152	41	15.75	18
20	113	141	148	151	154	162	49	13	18
64	150	164	171	170	177	191	41	13	18
65	192	207	214	215	222	232	40	15	18
66	222	234	242	243	246.5	261	39	12.5	18
67	211	224.75	232	236	239	256	45	14.25	18
68	241	257.25	261	262	265	278	37	7.75	18
69	257	276	280	280	285	306	49	9	18
70	249	258.5	261	263	265	272	23	6.5	18
71	255	288	291	292.5	298	310	55	10	18
72	239	261.75	271	270	281.25	297	58	19.5	18
73	279	291	296	295	302	316	37	11	18
74	265	284.25	289	292	296	305	40	11.75	18
112	21	49	62	62	77.25	91	70	28.25	18
113	83	95.5	104	107	111.5	125	42	16	18
114	42	64.75	75	77	86	106	64	21.25	18
115	63	77	85	87	95	107	44	18	18
116	72	91.25	101	103	111.75	120	48	20.5	18
117	72	92.75	98	100	106	120	48	13.25	18

118	72	86	96	100	105	118	46	19	18
119	83	102	109	109	114	129	46	12	18
120	88	119.5	124	124	130	139	51	10.5	18
121	100	111.5	119	121	126.5	132	32	15	18
122	116	127.75	132	133	138	146	30	10.25	18
123	120	140	149	151	157	173	53	17	18
124	115	124.75	128	127.5	131.25	137	22	6.5	18
125	124	126	128	128	130.5	133	9	4.5	18
127	95	114	118	121	125	132	37	11	18
128	119	130.5	135	134	138.5	150	31	8	18
129	108	124	130	130	136	148	40	12	18
130	84	108.5	114	115.5	119.75	129	45	11.25	18
131	115	123.25	130	130	135	146	31	11.75	18
132	129	144	150	151	157	169	40	13	18
133	115	132	136	136	142.5	157	42	10.5	18
134	139	152.5	158	158	161	173	34	8.5	18
135	138	154.75	158	158.5	163	172	34	8.25	18
175	169	178	183	183	187	195	26	9	18
176	155	179	184	186	190	205	50	11	18
177	214	237.25	245	245	251.75	274	60	14.5	18
178	201	214	221	218	228	245	44	14	18
213	176	195.75	201	202	210	214	38	14.25	18
214	71	81	87	88	90.75	107	36	9.75	18
215	84	94.75	102	105.5	110.5	112	28	15.75	18
216	280	286	290	289	293.5	303	23	7.5	18
217	288	297.25	300	301	303	307	19	5.75	18
218	303	313.25	316	316.5	319	322	19	5.75	18
219	82	87	92	91	95.75	107	25	8.75	18
220	86	95.25	100	99.5	107	111	25	11.75	18
221	285	303.25	307	308	312.75	321	36	9.5	18
222	202	212	218	217.5	225	232	30	13	18
223	74	81	86	85	88	108	34	7	18
224	282	294	298	299	303	311	29	9	18
225	292	302	308	307.5	315.5	323	31	13.5	18
226	316	318	322	321.5	324	330	14	6	18
227	108	115.5	119	118	121.5	139	31	6	18
228	203	208	221	216	233.75	243	40	25.75	18

Tab. 8.9: statistische Werte der Zeitreihenanalyse.

β = Steigung der Phase, α = Signifikanzniveau der Steigung,
 R^2 = Bestimmtheitsmaß der linearen Regression

1951 bis 2008				1951 bis 1980				1981 bis 2008			
Phase	β	α	R^2	Phase	β	α	R^2	Phase	β	α	R^2
175	0	n.s.	0	130	0	n.s.	0	117	0	n.s.	0
								124	0	n.s.	0
14	0.21	#	0.1	6	0.02	n.s.	0	72	0.83	***	0.4
17	0.12	#	0.05	7	0.28	~	0.09	73	0.45	*	0.21
66	0.03	n.s.	0	8	0.41	*	0.19	127	0.14	n.s.	0
70	0.22	*	0.17	9	0.21	n.s.	0.04	178	0.99	***	0.49
71	0.1	~	0.03	11	0.22	n.s.	0.04	214	0.22	n.s.	0.02
72	0.49	***	0.35	12	0.35	*	0.2	215	0.57	~	0.11
73	0.3	***	0.41	13	0.32	*	0.19	219	0.19	n.s.	0.02
74	0.25	***	0.18	14	0.64	***	0.48	221	0.69	#	0.16
121	0.13	n.s.	0.02	15	0.35	#	0.11	223	0.44	~	0.09
125	0.26	~	0.87	16	0.04	n.s.	0	226	0.3	~	0.13
129	0.03	n.s.	0	17	0.26	~	0.05				
133	0.19	~	0.06	18	0.51	**	0.24				
134	0.12	n.s.	0.03	64	0.14	n.s.	0.04				
135	0.15	~	0.04	66	0.32	*	0.13				
176	0.14	n.s.	0.03	67	0.14	n.s.	0.03				
177	0.1	n.s.	0.02	68	0.09	n.s.	0.01				
178	0.18	#	0.07	69	0.18	~	0.08				
214	0.22	n.s.	0.02	70	0.27	~	0.13				
215	0.57	~	0.11	71	0.48	*	0.14				
219	0.19	n.s.	0.02	72	0.68	*	0.18				
221	0.69	#	0.16	73	0.17	#	0.1				
223	0.44	~	0.09	74	0.76	***	0.5				
226	0.3	~	0.13	115	0.12	n.s.	0.01				
				116	0.32	~	0.08				
				120	0.39	**	0.29				
				121	0.31	~	0.07				
				122	0.1	n.s.	0.01				
				123	0.28	~	0.11				
				124	0.27	~	0.21				
				125	0.26	~	0.87				
				128	0.24	~	0.1				
				129	0.61	**	0.38				
				131	0.13	n.s.	0.03				
				132	0.19	~	0.04				
				133	0.35	#	0.12				

				134	0.2	~	0.1					
				135	0.3	#	0.12					
				175	0.15	n.s.	0.04					
				176	0.26	n.s.	0.06					
				177	0.79	**	0.35					
1	-0.61	***	0.21	1	-0.18	n.s.	0.01	1	-1.18	*	0.15	
2	-0.44	***	0.24	2	-0.08	n.s.	0	2	-1.24	***	0.39	
3	-0.12	~	0.03	3	-0.64	*	0.18	3	-0.12	n.s.	0.01	
4	-0.28	**	0.13	4	-0.27	~	0.04	4	-0.76	*	0.22	
5	-0.23	**	0.16	5	-0.17	n.s.	0.03	5	-0.51	*	0.19	
6	-0.31	**	0.12	8	-0.51	***	0.37	6	-0.88	*	0.22	
7	-0.12	~	0.05	10	-0.02	n.s.	0	7	-0.31	~	0.08	
8	-0.09	~	0.04	13	-0.26	#	0.13	9	-0.21	~	0.05	
9	-0.08	~	0.02	19	-0.01	n.s.	0	10	-1.34	n.s.	0.13	
10	-0.14	~	0.03	20	-0.03	n.s.	0	11	-0.95	***	0.35	
11	-0.42	***	0.28	65	-0.32	#	0.12	12	-0.2	~	0.07	
12	-0.03	n.s.	0.01	112	-0.21	n.s.	0.01	14	-0.68	n.s.	0.12	
13	-0.13	*	0.1	113	-0.17	n.s.	0.03	15	-0.34	#	0.13	
15	-0.09	~	0.03	114	-0.15	n.s.	0.01	16	-0.86	***	0.55	
16	-0.31	***	0.3	116	-0.78	**	0.32	17	-0.27	#	0.1	
18	-0.25	**	0.15	117	-0.07	n.s.	0	18	-0.96	***	0.52	
19	-0.31	***	0.31	118	-0.38	~	0.07	19	-0.81	***	0.45	
20	-0.4	***	0.44	119	-0.25	~	0.07	20	-0.93	***	0.49	
64	-0.23	***	0.21	178	-0.55	*	0.18	64	-0.53	**	0.27	
65	-0.45	***	0.49					65	-0.61	**	0.31	
67	-0.33	***	0.29					66	-2.17	#	0.31	
68	-0.09	#	0.06					67	-1.08	***	0.62	
69	-0.12	#	0.06					68	-0.37	*	0.22	
112	-0.29	*	0.07					69	-0.99	***	0.59	
113	-0.27	**	0.18					70	-0.02	n.s.	0	
114	-0.34	**	0.14					71	-0.54	*	0.22	
115	-0.21	*	0.09					74	-0.46	*	0.18	
116	-0.24	**	0.13					112	-1.08	**	0.25	
117	-0.12	~	0.03					113	-0.3	~	0.05	
118	-0.12	n.s.	0.01					114	-1.04	**	0.28	
119	-0.24	**	0.17					115	-0.54	#	0.13	
120	-0.18	*	0.12					118	-2.37	~	0.37	
122	-0.04	n.s.	0					119	-0.42	#	0.12	
123	-0.3	***	0.22					120	-0.27	~	0.05	
124	-0.14	n.s.	0.06					121	-0.55	n.s.	0.03	
127	-0.07	n.s.	0.01					122	-1.53	*	0.54	
128	-0.16	**	0.17					123	-0.92	***	0.48	
130	-0.14	n.s.	0.03					127	-0.14	n.s.	0.02	
131	-0.27	***	0.31					128	-0.23	~	0.06	

132	-0.28	***	0.24				129	-0.27	~	0.08
213	-0.2	n.s.	0.01				130	-1.59	~	0.15
216	-0.27	n.s.	0.04				131	-0.65	***	0.54
217	-0.17	n.s.	0.03				132	-0.87	***	0.57
218	-0.11	n.s.	0.02				133	-1.15	~	0.13
220	-0.28	n.s.	0.04				134	-1.54	~	0.18
222	-1.13	**	0.49				135	-0.82	n.s.	0.07
224	-0.67	#	0.21				175	-0.53	n.s.	0.05
225	-0.89	*	0.31				176	-0.7	n.s.	0.06
227	-0.2	n.s.	0.02				177	-0.68	*	0.21
228	-2.16	***	0.61				213	-0.2	n.s.	0.01
							216	-0.27	n.s.	0.04
							217	-0.17	n.s.	0.03
							218	-0.11	n.s.	0.02
							220	-0.28	n.s.	0.04
							222	-1.13	**	0.49
							224	-0.67	#	0.21
							225	-0.89	*	0.31
							227	-0.2	n.s.	0.02
							228	-2.16	***	0.61
				223	-	-	125	-	-	-
				214	-	-				
				215	-	-				
				216	-	-				
				217	-	-				
				218	-	-				
				219	-	-				
				220	-	-				
				221	-	-				
				222	-	-				
				223	-	-				
				224	-	-				
				225	-	-				
				226	-	-				
				227	-	-				
				228	-	-				

Literaturverzeichnis

- [nat 1939] Phenology of 1938. In: *Nature* 143 (1939), S. 728 – 729
- [nat 1941] Phenology of 1940. In: *Nature* 147 (1941), S. 802 – 802
- [Ahas u. a. 2002] AHAS, R. ; AASA, A. ; MENZEL, Anette ; FEDOTOVA, V. G. ; SCHEIFINGER, H.: Changes in european spring Phenology. In: *International Journal of Climatology* 22 (2002), S. 1727 – 1738
- [Apostol u. a. 2007] APOSTOL, Kent G. ; JACOBS, Douglas F. ; WILSON, Barrett C. ; SALIFU, K. F. ; DUMROESE, R. K.: Growth, gas exchange and root respiration of *Quercus rubra* seedlings exposed to low root zone temperatures in solution culture. In: *Forest Ecology and Management* 253 (2007), S. 89 – 96
- [Becker u. a. 1988] BECKER, Richard A. ; CHAMBERS, John M. ; WILKS, Allan R.: *The new S language: a programming environment for data analysis and graphics*. Monterey, CA, USA : Wadsworth and Brooks/Cole Advanced Books & Software, 1988. – ISBN 0-534-09192-X
- [Bequet u. a. 2011] BEQUET, R. ; CAMPIOLE, M. ; KINT, V. ; VANSTEENKISTE, D. ; MUYS, B ; CEULEMANS, R.: Leaf area index development in temperate oak and bech forests is driven by stand characteristics and weather conditions. In: *Trees* 25 (2011), S. 935 – 946
- [Bissolli u. a. 2005] BISSOLLI, Peter ; MÜLLER-WESTERMEIER, Gerhard ; DITTMANN, Ernst ; REMIŠOVÁ, Viera ; BRASLAVSKÁ, Oľga ; ŠŤASTNÝ, Pavel: 50-year time series of phenological phases in Germany and Slovakia: a statistical comparison. In: *Meteorologische Zeitschrift* 14 (2005), S. 173 – 182
- [Bissolli u. a. 2007] BISSOLLI, Peter ; MÜLLER-WESTERMEIER, Gerhard ; POLTERUDOLF, C.: Aufbereitung und Darstellung phänologischer Daten. In: *promet* 33 (2007), S. 14 – 19
- [Bruns 2007] BRUNS, Ekko: Phänologische Beobachtungsnetze heute und gestern. In: *promet* 33 (2007), Nr. 1, S. 2 – 6
- [Chuine u. a. 2003] CHUINE, Isabelle ; KRAMER, Koen ; HÄNNINEN, Heikki ; SCHWARZ, Mark D. (Hrsg.): *Plant development Models*. Kluwer Academic Publisher, 2003 (Phenology: an integrative environmental science). – 217 – 235 S. – ISBN 1-4020-1580-1

- [Cleveland u. Terpenning 1992] CLEVELAND, W.S. ; TERPENNING, I.J.: Graphical methods for seasonal adjustments. In: *Journal of the American Statistical Association* 77 (1992), S. 52 – 62
- [Donaghue 2004] DONAGHUE, John R.: Implementing Shaffer's multiple comparison procedure for a large number of groups. In: *Benjamini, Bretz and Sarkar (eds) Recent Developments in Multiple Comparison Procedures (Institute of Mathematical Statistics Lecture Notes-Monograph Series 47* (2004), S. 1 – 23
- [Dose u. Menzel 2004] DOSE, Volker ; MENZEL, Anette: Bayesian analysis of climate change impacts in phenology. In: *Global Change Biology* 10 (2004), S. 259 – 272
- [DWD | DWD: *Deutscher Wetterdienst (DWD)*. <http://www.dwd.de>, Abruf: 26.02.2011
- [DWD 1991] DWD: *Anleitung für die phänologischen Beobachter des Deutschen Wetterdienstes*. 3. Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, 1991
- [Graves u. a. 2011] GRAVES, Spencer ; PIEPHO, Hans-Peter ; SELZER, Luciano: *multcompView: Visualization of Paired Comparisons*, 2011. <http://cran.r-project.org/web/packages/multcompView/index.html>. – Version 0.1-3
- [Henniges u. a. 2005] HENNIGES, Y. ; DANZEISEN, H. ; ZIMMERMANN, R.-D.: Regionale Klimatrends mit Hilfe der phänologischen Uhr, dargestellt am Beispiel Rheinland-Pfalz. In: *Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung* 17 (2005), S. 28 – 34
- [Henniges u. Chmielewski 2006] HENNIGES, Yvonne ; CHMIELEWSKI, Frank-Michael: Stadt-Umland-Gradienten phänologischer Phasen im Raum Berlin 2006 / Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften. 2006. – Forschungsbericht
- [Hense u. Müller 2007] HENSE, A. ; MÜLLER, M.: Geostatistische Modellierung und Qualitätskontrolle von phänologischen Beobachtungen. In: *promet* 33 (2007), Nr. 1, S. 7 – 13
- [Hothorn u. a. 2011] HOTHORN, Torsten ; BRETZ, Frank ; WESTFALL, Peter ; HEIBERGER, Richard M. ; SCHUETZENMEISTER, Andre: *multcomp: Simultaneous Inference in General Parametric Models*, 2011. <http://cran.r-project.org/web/packages/multcomp/index.html>. – Version 1.2-7
- [Hyndman u. Fan 1996] HYNDMAN, Rob J. ; FAN, Yanan: Sample quantiles in statistical packages. In: *American Statistician* 50 (1996), S. 361 – 365
- [Ihne 1910] IHNE, Egon: Ueber Beziehungen zwischen Pflanzenphänologie und Landwirtschaft. In: *Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft* 161 (1910)
- [Ihne u. Hoffmann 1884] IHNE, Egon ; HOFFMANN, Heinrich: Contribution to Phenology. In: *Nature* (1884), S. 558 – 559

- [IPG] IPG: *International Phenological Gardens*. <http://www.agrar.hu-berlin.de/struktur/institute/nptw/agrarmet/phaenologie>, Abruf: 22.04.2011
- [Keitt u. a. 2011] KEITT, Timothy H. ; BIVAND, Roger ; PEBESMA, Edzer ; ROWLINGSON, Barry: *rgdal: Building for the Geospatial Data Abstraction Library*, 2011. <http://cran.r-project.org/web/packages/rgdal/index.html>. – Version 0.7-1
- [Lauscher 1978] LAUSCHER, Friedrich: Neue Analysen ältester und neuerer phänologischer Reihen. In: *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie* 26 (1978), S. 373 – 385
- [Lewin-Koh u. Bivand 2011] LEWIN-KOH, Nicholas J. ; BIVAND, Roger: *maptools: Tools for reading and handling spatial objects*, 2011. <http://cran.r-project.org/web/packages/maptools/index.html>. – Version 0.8-10
- [Linkosalo u. a. 2000] LINKOSALO, Tapio ; CARTER, Timonthy R. ; HÄKKINEN, Risto ; HARI, Pertti: Predicting spring phenology and frost damage risk of *Betula* spp. under climatic warming: a comparison of two models. In: *Tree physiology* 20 (2000), S. 1175 – 1182
- [Linkosalo u. a. 2006] LINKOSALO, Tapio ; HÄKKINEN, Risto ; HÄNNINEN, Heikki: Models of the spring phenology of boreal and temperate trees: is there something missing? In: *Tree physiology* 26 (2006), S. 1165 – 1172
- [LUBW 2006] LUBW: Aktualisierte Umwelterklärung / Umweltmanagement. 2006. – Forschungsbericht
- [LUBW 2007] LUBW: Naturschutz-Info / Fachdienst Naturschutz. 2007 (2). – Forschungsbericht
- [LUBW 2010] LUBW: Naturschutz-Info / Fachdienst Naturschutz. 2010 (1). – Forschungsbericht
- [MacDowall 1934] MACDOWALL, Alex. B.: Sun-Spots and Phenology. In: *Nature* 68 (1934), S. 389 – 390
- [McMaster u. Wilhelm 1998] MCMMASTER, Gregory S. ; WILHELM, Wallace W.: Is Soil Temperature Better than Air Temperature for Predicting Winter Wheat Phenology? In: *Agronomy Journal* 90 (1998), S. 602 – 607
- [Menzel 2003] MENZEL, Anette: Plant Phenological Anomalies in Germany and their relation to air Temperature and NAO. In: *Climatic Change* 57 (2003), S. 243 – 263
- [Menzel u. a. 2001] MENZEL, Anette ; ESTRELLA, Nicole ; FABIAN, Peter: Spatial and temporal variability of the phenological seasons in Germany from 1951 to 1996. In: *Global Change Biology* 7 (2001), S. 657 – 666

- [Menzel u. a. 2005] MENZEL, Anette ; SPARKS, Tim H. ; ESTRELLA, Nicole ; ECKHARDT, S.: 'SSW to NNE' – North Atlantic Oscillation affects the progress of seasons across Europe. In: *Global Change Biology* 11 (2005), S. 909 – 918
- [Menzel u. a. 2006] MENZEL, Anette ; SPARKS, Tim H. ; ESTRELLA, Nicole ; KOCH, Elisabeth ; AASA, Anto ; AHAS, Rein ; ALM-KÜBLER, Kerstin ; BISOLLI, Peter ; BRASLAVSKÁ, Olga ; BRIED, Agrita ; CHMIELEWSKI, Frank M. ; CREPINSEK, Zalika ; CURNEL, Yannik ; DAHL Åslög ; DEFILA, Claudio ; DONNELLY, Alison ; FILELA, Yolanda ; JATCZAK, Katarzyna ; MÅGE, Finn ; MESTRE, Antonio ; NORDLI Öyvind ; PENUELAS, Josep ; PIRINEN, Pentti ; REMIŠOVÁ, Viera ; SCHNEIFINGER, Helfried ; STRITZ, Martin ; SUSNIK, Andreja ; VLIET, Arnold J. H. ; FRANS-EMILWIELGOLASKI ; ZACH, Susanne ; ZUST, Ana: European phenological response to climate change matches the warming pattern. In: *Global Change Biology* 12 (2006), S. 1969 – 1976
- [MeteoSchweiz] METEOSCHWEIZ: *MeteoSchweiz*. <http://www.meteoschweiz.admin.ch>, Abruf: 20.04.2011
- [Piepho 2004] PIEPHO, Hans-Peter: An Algorithm for a Letter-Based Representation of All-Pairwise Comparisons. In: *Journal of Computational and Graphical Statistics* 13(2) (2004), S. 456 – 466
- [Planet-Wissen a] PLANET-WISSEN: *Aktion Apfelblütenland - Murgtal 2009*. <http://www.planet-wissen.de>, Abruf: 26.02.2011
- [Planet-Wissen b] PLANET-WISSEN: *Aktion Apfelblütenland - Murgtal 2010*. <http://www.planet-wissen.de>, Abruf: 26.02.2011
- [R Development Core Team 2009] R DEVELOPMENT CORE TEAM: *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2009. <http://www.R-project.org>. – ISBN 3-900051-07-0
- [Repoa u. a. 2004] REPOA, Tapani ; LEINONEN, Ilkka ; RYYPÖ, Aija ; FINÉR, Leena: The effect of soil temperature on the bud phenology, chlorophyll fluorescence, carbohydrate content and cold hardiness of Norway spruce seedlings. In: *Physiologia Plantarum* 121 (2004), S. 93 – 100
- [Royston 1995] ROYSTON, Patrick: Remark AS R94: A remark on Algorithm AS 181: The W test for normality. In: *Applied Statistics* 44 (1995), S. 547 – 551
- [Schleip u. a. 2006] SCHLEIP, Christoph ; MENZEL, Annette ; ESTRELLA, Nicole ; DOSE, Volker: The use of Bayesian analysis to detect recent changes in phenological events throughout the year. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 141 (2006), S. 179 – 191
- [Schnelle 1948a] SCHNELLE, Fritz: Studien zur Phänologie Mitteleuropas. In: *Mitteilungen des Deutschen Wetterdienstes in der US-Zone* 2 (1948), S. 1 – 28
- [Schnelle 1948b] SCHNELLE, Fritz: Zweck und Ziel des Phänologischen Dienstes. In: *Mitteilungen des Deutschen Wetterdienstes in der US-Zone* 1 (1948), S. 1 – 12

- [Schnelle 1967] SCHNELLE, Fritz: Der agrarmeteorologische Dienst des Deutschen Wetterdienstes der Bundesrepublik Deutschland. In: *Agricultural Meteorology* 4 (1967), S. 1 – 10
- [Schönwiese 1983a] SCHÖNWIESE, C.D.: Zeitreihen-Filterung. In: *promet* 13 (1983), S. 19 – 22
- [Schönwiese 1983b] SCHÖNWIESE, C.D.: Zeitreihenkorrelation. In: *promet* 13 (1983), S. 23 – 25
- [Sekiguchi 1969] SEKIGUCHI, T.: The historical dates of Japanese cherry festival since the 8th century and her climatic changes. In: *Tokyo Geography Papers* 13 (1969), S. 175 — 190
- [Sparks u. Carey 1995] SPARKS, T. H. ; CAREY, P. D.: The responses of species to climate over two centuries: an analysis of the Marsham phenological record, 1736-1947. In: *Journal of Ecology* 83 (1995), S. 321 – 329
- [Witterstein 1971] WITTERSTEIN, Franz: Information für den Fachdienst. In: *Beilage zum Mitteilungsblatt des DWD* 2 (1971)
- [Wren 1901] WREN, H. B.: Relations between climate and crops. In: *Nature* 64 (1901), S. 493 – 495