



Florian Schober, *1991

Schule:
Johannes-Gutenberg-Gymnasium,
Waldkirchen

Eingang der Arbeit:
September 2010

Zur Veröffentlichung angenommen:
Januar 2012

Blühen Pflanzen heute früher?

Auswirkungen des Klimawandels auf den Blütetermin von Wild- und Nutzpflanzen in einem urbanen Raum

Der Klimawandel hat Einfluss auf jegliche biologischen Systeme. Mittels Herbar- und Pollenanalysen konnte in dieser Arbeit nachgewiesen werden, dass 17 Wildpflanzen der Münchner Stadtflora tendenziell im Jahresverlauf heute früher blühen als zu Sammelbeginn 1835. Diese Reaktion wird auf eine Erwärmung im Untersuchungsgebiet zurückgeführt. Für einige Wildpflanzen gilt der genannte Trend jedoch nicht.

1 Einleitung

Die Wissenschaft kennt mittlerweile eine ganze Reihe von Veränderungen, deren Ursache in einer langfristigen Klimaveränderung zu suchen ist [14]. So beobachtet man eine zeitliche Verschiebung der Phänologie, d. h. der Wachstumszyklen, von Pflanzen ebenso wie eine räumliche Artenverlagerung von 6,1 km pro Dekade in Richtung der Pole [13]. Damit verändert sich die Zusammensetzung der Bestäuber und derer Fressfeinde, was wiederum zahlreiche Konsequenzen nach sich zieht und schließlich zu einer generellen Verschiebung und Veränderung der Biosphäre führt. Jedoch muss bei diesen Beobachtungen insbesondere die Frage adressiert werden, welche der Veränderungen, die wir beobachten, denn tatsächlich auf dem Klimawandel beruhen.

Grundsätzlich lassen sich die dabei verwendeten Ansätze in zwei Kategorien einteilen.

(1) Der Testorganismus ist derselbe, jedoch werden die Klimabedingungen in einer künstlichen Umgebung verändert, was zum Beispiel mit Plastiktunneln oder künstlichem Nährstoffeintrag unter kontrollierten Bedingungen geschieht.

(2) Beobachtungen werden in natürlicher Umgebung über einen langen Zeitraum gesammelt und nach Trends untersucht. Insbesondere diese Methodiken bedürfen meistens indirekter Ansätze, da die beeinflussenden Klimaänderungen auf langfristiger Ebene Veränderungen hervorrufen, Experimente aber meist mitnichten am Beginn derart langer Zeiträume begonnen wurden.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit einer dieser indirekten Methodiken. In vielerlei Ansätzen gelang es bisher, in einem ländlichen Raum einen genügend großen Datensatz für eine Trendanalyse aufzu-

bauen. Fitter [6] zum Beispiel verwendete meteorologische Tagebücher einer Privatperson, um dadurch die Phänologie von 385 Pflanzenarten der britischen Flora in einem Ort in Südengland zu analysieren, die Aufzeichnungen umspannten dabei 47 Jahre. Menzel [11] benutzte für ihre Analysen die phänologischen Aufzeichnungen, die der Deutsche Wetterdienst jedes Jahr veröffentlicht [4]. Die Methodik von Menzel besitzt gegenüber der von Fitter den Vorteil, dass die Daten flächendeckend untersucht wurden und nicht auf ein lokal begrenztes Gebiet beschränkt waren. Doch bewegen sich beide Arbeiten nur innerhalb eines relativ kurzen Zeitraums. Andere Ansätze wie die Auswertung von Satellitendaten [12] oder CO₂-Messungen [9] decken zwar sehr große Bereiche ab, deren Daten können aber nur für die Analyse weniger Dekaden verwendet werden.

In dieser Arbeit wird das Ziel verfolgt, eine lückenlose Zeitreihe der Blütetermine vom 19. Jahrhundert bis heute für verschiedene Pflanzenarten in einem urbanen Raum, hier München, zu erstellen. Die These ist, dass die Blüte aller betrachteten Pflanzenarten heute deutlich früher eintritt als zu Beginn der verwendeten Aufzeichnungen vor 170 Jahren.

2 Material und Methoden

In dieser Arbeit soll somit ein Ansatz präsentiert werden, der zwar geografisch ebenfalls eingeschränkt fungiert, allerdings einen wesentlich längeren Zeitraum umspannt, je nach Art maximal bis 1835 zurückreicht. Grundsätzlich wurden dafür drei Datenquellen verwendet. (1) Zum einen die oben genannten Aufzeichnungen des Deutschen Wetterdienstes [4], die auch Menzel verwendete. Diese überspannen zwar nur einen kurzen Zeitraum, sind jedoch sehr exakt und wurden zur Validierung der anderen Methodiken verwendet. Um einen größeren Zeitrahmen zu umgreifen, wurden (2) Herbarbelege der botanischen Staatssammlung und (3) Bestäuberpräparate der zoologischen Staatssammlung ausgewertet. Beide Einrichtungen sind in München gelegen und gehören mit ihren umfangreichen Kollektionen zu den größten weltweit. Der Nachteil an den zwei zuletzt genannten Methoden besteht darin, dass die Daten durch Artefakte, wie verspätetes Sammeln oder mikroklimatische Einflüsse, inexakt sein können und somit zuerst validiert werden müssen.

2.1 Herbarbelege

In einem Herbarium sind präparierte Pflanzen zu finden, die auf großen Pappkartons fixiert und mit den genauen Sammelinformationen (Sammler, Ort, Datum,



Abb. 1: Typischer Herbarbeleg in der botanischen Staatssammlung München.

Gattung und Art, Bodenbeschaffenheit, etc.) versehen wurden (siehe Abb. 1 und 2).

Im Herbar wurde gezielt nach Arten gesucht, die in der Münchner Flora beheimatet sind [15]. Pflanzen, die in natürlicher Umgebung in großen Mengen auftreten, wie der gewöhnliche Löwenzahn aus der Gattung *Taraxacum*, wurden dabei vernachlässigt, denn Arten wie diese wurden aufgrund ihres Unkrautcharakters kaum gesammelt. Hingegen sind Belege von schöneren und selteneren Pflanzen wie der Fingerkuhschelle *Pulsatilla patens* L. sehr häufig vorhanden (23 Belege) und eignen sich somit für statistische Auswertungen. Benötigt wurde in erster Linie das Sammeldatum, zusätzlich wurde darauf geachtet, dass auf dem Herbarbeleg deutlich ein Blütenkelch erkennbar war. Diese Voraussetzung führte dazu, dass in etwa 75% aller Belege nicht verwendet werden konnten.

Da sämtliche untersuchten Arten in einem Zeitintervall von wenigen Wochen blühen, kann man davon ausgehen, dass das Sammeldatum ungefähr dem Blütezeitpunkt entspricht. Der statistische Fehler relativiert sich zudem bei steigender Datenmenge, weshalb von ausgeglichenen Wahrscheinlichkeiten für eine

Aufsammlung in der Gesamtanalyse ausgegangen wird. Auf diese Weise entstanden 219 Datenpunkte von 17 verschiedenen Pflanzenarten (siehe Tabelle 1).

Ein zusätzlicher Fehler könnte in der Eigenart der Sammler zu suchen sein, die vor allem im 19. Jahrhundert Pflanzen, insbesondere bei Spaziergängen in freier Zeit am Wochenende, gesammelt haben. Um diese These zu überprüfen, wurden mit Zellers Kongruenz [18] sämtliche Wochentage aus den gegebenen Daten bestimmt und auf signifikante Schwerpunkte untersucht. Tatsächlich wurde samstags und sonntags überdurchschnittlich oft gesammelt, wohingegen Montage und Dienstag unterrepräsentiert sind. Doch lediglich für Dienstag ist dieser Wert signifikant ($p < 0,05$), weshalb die genannte Hypothese verworfen wurde.

Die daraus erhaltenen Daten wurden in Kombination mit den Ergebnissen der Pollenanalyse (s. u.) auf Trends analysiert. Dazu wurden zunächst Ausreißer entfernt, die außerhalb des 1,5-fachen Interquartilsabstandes lagen. Mit der Programmiersprache „R“, die auch im Rahmen aller weiteren genannten Tests verwendet wurde, wurden nun durch die Datenpunkte lineare Trendgeraden gelegt, deren Steigung und Signifikanz errechnet wurden. Die Steigung der Geraden multipliziert mit 10 gibt die Veränderung des Blütetermins pro Dekade an. Im Folgenden bedeutet deshalb ein positiver Trend eine verspätet einsetzende Pflanzenblüte und umgekehrt. Trends mit $p < 0,1$ wurden als signifikant gewertet.

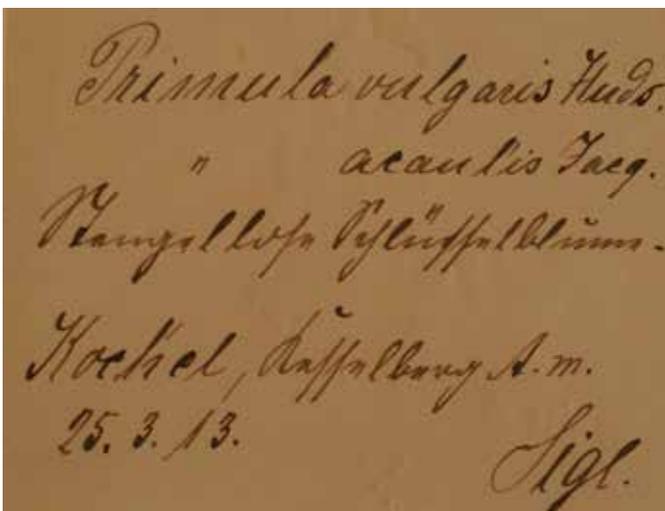


Abb. 2: Belegbeschriftung mit Art, Vorkommen, Ort, Datum und Sammler.

2.2 Pollenanalyse

Zur Validierung der Pflanzenproxies und zur Erweiterung des Datensatzes wurden Pollenanalysen verwendet. Dazu wurden von archivierten Bienen verschiedener Arten (siehe Tabelle 2), die im Stadtgebiet München gesammelt wurden, von Beinen und Abdomen mit einem Deckglas Pollenbrote abgeschabt und in einer basischen Fuchsinfärbelösung direkt auf dem Objektträger angefärbt und mit einem Nagellack versiegelt.

Mittels eines Bestimmungsschlüssels [2] wurde die Pflanzenart zu den Pollen bestimmt; somit konnte dem Sammeldatum der jeweiligen Biene der Blütezeitpunkt der entsprechenden Pflanzenart zugeordnet werden. Die Bienenarten wurden dabei so ausgewählt, dass diese als Bestäuber der Arten der Herbarbelege bekannt waren, um gezielt die Präzision zu erhöhen. Somit entstanden 70 Pollenpräparate, die großenteils brauchbares Material beinhalten. Im Mittel konnte pro Biene bzw. Präparat meist nur eine (passende) Pollenart identifiziert werden.

Die Daten der Pollenbelege wurden wegen ihrer geringen Datendichte nicht gesondert betrachtet, sondern zu der Menge der

Herbardaten der jeweiligen Art hinzugefügt. Aufgegliedert nach Früh- und Spätblühern unterscheiden sich die Kenngrößen von Herbar- und Pollendatenkollektiv nicht signifikant (siehe Abb. 3).

2.3 Meteorologische und phänologische Datensätze

Neben den verwendeten indirekten Ansätzen, den Herbarbelegen und Pollenanalysen, wurden Aufzeichnungen des Deutschen Wetterdienstes verwendet, die im deutsch-meteorologischen Jahrbuch veröffentlicht werden [4]. Darin sind meteorologische Zahlenwerte der verschiedenen Wetterstationen wie Temperatur, Niederschlag und Globalstrahlung notiert, aber auch detaillierte phänologische Daten von verschiedenen Pflanzenarten aus den 89 deutschen Naturräumen. Bei der Analyse wurden die Daten der Pflanzenarten *Zea mays L.* und *Brassica napus L.* von 1995 bis 2004 aus den Naturräumen „Münchener Ebene“, Station München/Flughafen, und „Neißegebiet“, Station Görlitz, verwendet. Die hohe Signifikanz der Korrelationen nach dem Wilcoxon-Test (Vorzeichen-Rangsummentest) zeigt, dass dieser kurze Zeitraum ausreicht, um eine übergeordnete Gesetzmäßigkeit ableiten zu können. Damit wird eine Antwort

Artname (lat.)	Belege
<i>Andrena avipes</i>	18
<i>Andrena bicolor</i>	7
<i>Andrena carbonaria</i>	4
<i>Andrena labiata</i>	2
<i>Anthophora acervorum</i>	8
<i>Anthophora retusa</i>	1
<i>Osmia bicolor</i>	3
<i>Osmia caerulea</i>	8
<i>Osmia parvula</i>	10
<i>Xylocopa violacea</i>	2

Tab. 2: Übersicht der verwendeten Bienenarten.

auf die Frage gesucht, wie Nutzpflanzen auf Klimaschwankungen im Vergleich zu Wildpflanzen reagieren. Gelingt eine Korrelation, so kann mit dem Wissen um das Verhalten der Wildpflanzen über einen langen Zeitraum auf das der Nutzpflanzen in Zukunft geschlossen werden, was wertvolle Informationen für die Landwirtschaft birgt.

Korrelationen der gelisteten Wildpflanzen (siehe Tabelle 1) mit dem Klima wurden anhand von Aufzeichnungen der Wetterstation Hohenpeißenberg durchgeführt, da die Station München/Flughafen erst

Artname (lat.)	Artname (dt.)	Trend (d/10a)	Belege (aussortiert)
Signifikant			
<i>Primula elatior L.</i>	Große Schlüsselblume	1,9	9
<i>Centaurea stoebe ssp. micranthos</i>		-2,4	9
<i>Centaurea stoebe L.</i>	Rispen-Flockenblume	-3,1	7 (1)
<i>Eragrostis minor HOST</i>	Kleines Liebesgras	-7,8	9
Nicht signifikant			
<i>Pulmonaria angustifolia L.</i>	Schmalblättriges Lungenkraut	1,3	11 (4)
<i>Primula farinosa L.</i>	Mehlprimel	1,1	17 (2)
<i>Lamium montanum L.</i>	Berggoldnessel	0,6	8
<i>Galeopsis ladanum L.</i>	Kalkschutt-Hohlzahn	0,3	15
<i>Viola hirta L.</i>	Rauhaariges Veilchen	0,2	37
<i>Primula veris L.</i>	Echte Schlüsselblume	0,08	14 (2)
<i>Salvia pratensis L.</i>	Wiesensalbei	0,02	6
<i>Leucanthemum vulgare LAM.</i>	Margerite	-0,5	10 (2)
<i>Pulsatilla patens L.</i>	Finger-Küchenschelle	-0,7	23 (3)
<i>Viola reichenbachiana BOREAU</i>	Waldveilchen	-0,9	15
<i>Prunella vulgaris L.</i>	Kleine Braunelle	-1,3	11 (1)
<i>Gentiana clusii PERRIER & SONGEGON</i>	Stängelloser Kalk-Enzian	-2,1	10
<i>Epilobium dodonaei L.</i>	Rosmarin-Weidenröschen	-2,7	8

Tab. 1: Herbarbelege nach Arten und Trends, siehe „Ergebnisse“.

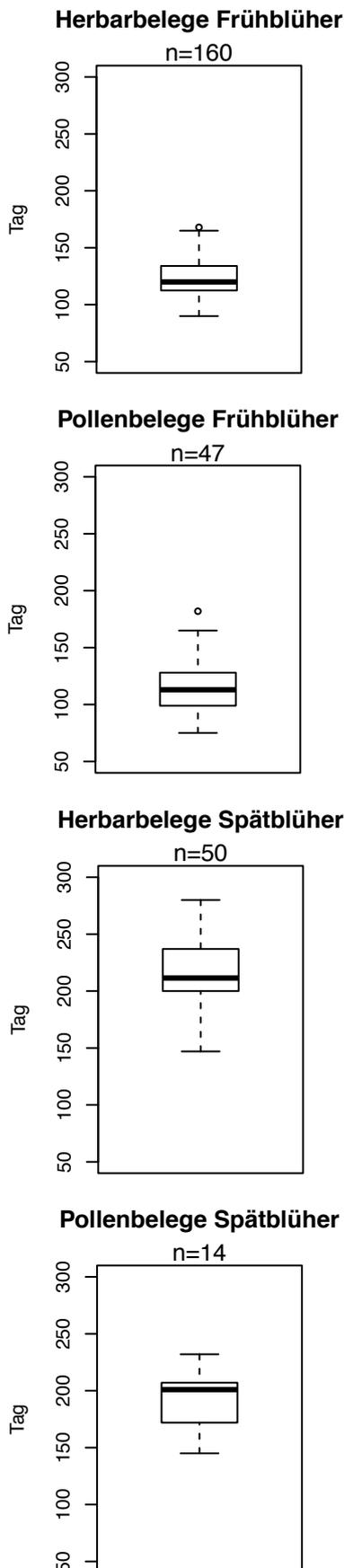


Abb. 3: Die Daten von Herbarbelegen und aus Pollenpräparaten wurden nach früh- und spätblühenden Pflanzen aufgegliedert und deren Verteilung verglichen. Unterschiede zwischen Herbar- und Pollendaten sind jeweils nicht signifikant für $\alpha=0.1$, zwischen Früh- und Spätblühern signifikant für $\alpha=0.001$.

seit 20 Jahren Daten sammelt, Hohenpeißenberg jedoch seit 1870. Hohenpeißenberg liegt etwa 60 Kilometer südwestlich von München und damit nicht im phänologischen Naturraum der Schotterebene, weshalb Klimadaten der Stationen Hohenpeißenberg und München/Flughafen auf Korrelation untersucht wurden (t-Test für zwei verbundene Stichproben). Es zeigte sich für einen Zeitraum von 1992 bis 2010 ein signifikanter Zusammenhang täglicher Aufzeichnungen für Temperatur, Niederschlag und Sonnenscheindauer ($p < 0,001$). Die Wetterwarte Hohenpeißenberg kann also auch für den Raum München verwendet werden.

2.4 Klimaanalyse der Stadt München

Diese Arbeit beschränkt sich auf das Gebiet der Münchener Schotterebene, um mit der Annahme eines einheitlichen Klimas eine ähnliche Temperatur- und Niederschlagsänderung im gesamten Untersuchungsraum voraussetzen zu können. Ein Problem stellt jedoch der enorme Einfluss des Stadtklimas dar. Gebäude haben andere physikalische Eigenschaften als die natürliche Landschaft, womit sich zum Beispiel die Wärmekapazität ändert. Grundsätzlich ist das Klima in Städten durch die Bildung von Wärme- oder Kälteinseln differenziert zu dem im Umland zu betrachten [7], dies hat wiederum Einflüsse auf die Phänologie jeglicher Pflanzenarten.

Um diesen Effekt untersuchen zu können, wurde mit ENVI-met Version 3.1 Beta I [3] eine Stadtklimaanalyse von München

durchgeführt. Dabei wurde das Stadtgebiet anhand des Flächennutzungsplans München [17] mit $500 \times 390 \times 50$ Würfeln simuliert (siehe Abb. 4), deren Eigenschaften einzeln definiert wurden (7 Parameter, z. B. Wasserflächen, Asphalt, Grasvegetation, Bewaldung). Die relativen Gebäudehöhen wurden je nach Eintragung im Flächennutzungsplan (z. B. Industriegebiet, Stadtzentrum, Wohnraum) als konstant angenommen.

2.5 Gen- und Proteinalignments

Es liegt nahe, dass Pflanzen mit ähnlichen Reaktionen auf sich verändernde Umweltparameter näher verwandt sind als Pflanzen mit verschiedener Reaktion. Dafür wurde mittels Gen- und Proteinalignments für 12 der untersuchten Pflanzen ein quantitativer taxonomischer Stammbaum erstellt. Das verwendete Gen ITS1 („Internal Transcribed Spacer 1“) mit einer Länge von 150bp ist Teil der nukleären ribosomalen DNA und wird als Intron bei der Transkription herausgeschnitten und degradiert. Somit codiert es nach aktuellem Kenntnisstand nicht für ein Genprodukt, weshalb Mutationen keinerlei evolutionärem Druck unterliegen. Unter der Annahme einer konstanten Mutationsrate eignet es sich somit sehr gut zur Erstellung von Stammbäumen [1], [10].

Die Sequenzen wurden der EMBL Nucleotide Sequence Database [16] entnommen. Für das Alignment wurde ClustalW2 als Algorithmus auf Basis einer BLOSUM-Matrix verwendet. Die Übereinstimmung

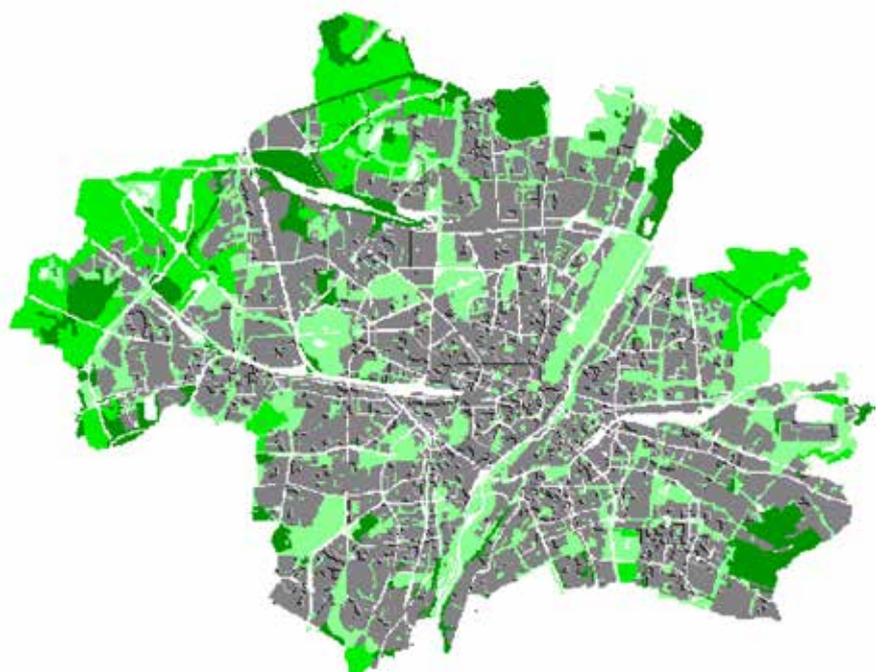


Abb. 4: Rohdaten für die Mikroklimateanalyse der Stadt München.

zweier Sequenzen wurde als relativer Score in Prozent ausgegeben, um Daten vergleichbar zu halten. Auf Grundlage der Übereinstimmungen einer Sequenz mit jeder anderen der 12 weiteren Sequenzen wurde der Verwandtschaftsgrad bestimmt. Für sechs Arten konnte ein Alignment mittels des Gens für die Ribulose-1,5-bisphosphat-carboxylase/-oxygenase (RuBisCO) durchgeführt werden, ebenfalls für sechs Arten ein Aminosäuresequenzalignment für die Maturase K (matK).

Die relative Übereinstimmung zweier Alignments (entspricht dem Identitätsscore) wurde gegen die absolute Differenz der Blütezeitpunkte der entsprechenden Pflanzen aufgetragen.

3 Ergebnisse

3.1 Stadtklimaanalyse

Die Legitimation für jedwede weitere Untersuchung der Proxydaten liefert die Stadtklimaanalyse mit ENVI-met (siehe Abb. 5). Mit ihr konnte gezeigt werden, dass die Sammelorte, hauptsächlich im Norden und Südosten von München und in Richtung Starnberg, dem Einfluss des Stadtklimas nicht unterliegen. Dies lässt sich durch die Lage Münchens erklären, der Deutsche Wetterdienst verzeichnet hauptsächlich Wind aus Westen [19], weshalb die meisten Datenpunkte nicht in den Einfluss einer städtischen Luftströmung kommen, lediglich im englischen Garten (in der Abbildung mit „E“ gekennzeichnet) kann eine deutliche und im botanischen Garten („B“) eine leichte Abkühlung verzeichnet werden, allerdings betrifft diese nur in etwa zwei bzw. fünf Datenpunkte der Herbarbelege, weshalb die Auswirkungen ignoriert wurden. Dies ist insofern legitim, als dass die problematischen Werte keine signifikanten Abweichungen vom linearen Trend des jeweiligen Artenkollektivs zeigen.

3.2 Herbar- und Pollenanalyse

Auf der Grundlage der oben genannten Klimaanalyse konnten sämtliche Werte aus der Herbar- und Pollenanalyse statistisch analysiert werden. Bei einer durchschnittlichen Erwärmung von 2,2K in Hohenpeißenberg seit 1870 bis 2000 wurde ein generell negativer Trend der Blütezeit erwartet, d. h., Pflanzen sollten heute im Jahresverlauf früher blühen als noch vor einigen Jahrzehnten. Dies konnte jedoch nur bei 11 der 17 untersuchten Pflanzenarten festgestellt werden (drei signifikant,

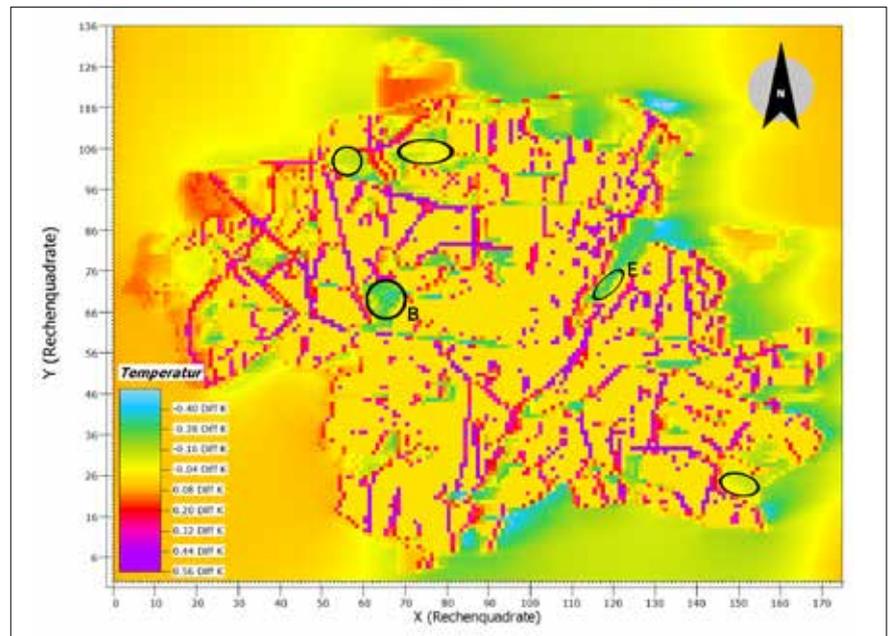


Abb. 5: Beispielhaftes Ergebnis aus der Stadtklimaanalyse für München um 20.30 Uhr am 31. März 2008. Die Auswirkungen der als oftmals konstant angenommenen Gebäudehöhen sind zu erkennen, allerdings wird ebenso deutlich, dass sich die untersuchten Sammelgebiete (eingekreist) nicht signifikant voneinander unterscheiden.

siehe Tabelle 1 und Abb. 6). Wurden die Werte der Pollenanalyse hinzugefügt, so änderten sich die Trends nur unwesentlich im Bereich von -0,3 Tage/Dekade bis +0,2 Tage/Dekade, es entstanden keinerlei neue Signifikanzen. Dies wurde bereits nach der Aufschlüsselung der Kollektivparameter erwartet (Abb. 3). Erwähnenswert dabei ist jedoch, dass der signifikant positive Trend ($p < 0,01$) von *Primula elatior L.* mit einer positiven Trendabweichung nach Hinzufügen der Pollendaten bestätigt wurde.

Das heißt, Pflanzen reagieren in ihrer Phänologie nicht einheitlich mit früheren Blütezeiten auf eine Temperaturerhöhung, sondern können in wenigen Fällen sogar entgegengesetztes Verhalten zeigen. Die Beobachtung scheint sinnwidrig zu sein, diese Arbeit zeigt allerdings keinen Einzelfall auf. Auch in [6] konnten bei 10 Arten (3 % aller untersuchten Arten) positive Trends verzeichnet werden, ebenso in [11]. In Anbetracht der Signifikanz der Herbar- und Validierung durch die Pollenanalyse muss es also eine Begründung für positive Trends geben. Tatsächlich zeigt eine statistische Analyse, dass sich Herbar- und Pollen- und Temperaturdaten gegengleich verhalten. Für die Temperaturdaten wurde die Durchschnittstemperatur 30 Tage vor dem eigentlichen Blütezeitpunkt verwendet, diese hat sich bei dieser Art als am günstigsten erwiesen, je kürzer oder länger der Zeitraum, umso

zufälliger fielen die Korrelationen aus. Ein Gleichläufigkeitstest [5] konnte diese negative Korrelation für $p < 0,01$ signifikant bestätigen. Das heißt, je wärmer ein Jahr ist, umso später blüht diese Pflanzenart.

Trägt man das Sammeljahr aller Daten beider Studienkollektive gegen das Sammeldatum auf, so fallen vier Punktezentren auf (siehe Abb. 7, S. 52). In der Abszissen-dimension ist die Ursache wahrscheinlich historischer Art, die geringere Datendichte tritt um das Jahr 1920 auf, endet aber noch vor dem Zweiten Weltkrieg. Gründe dafür sind nicht bekannt. Die Zentrenbildung in Ordinateurichtung lässt sich auf das Studienkollektiv zurückführen, es handelt sich dabei um früh- und spätblühende Pflanzen, was mittels t -Tests der statistischen Kenngrößen Varianz und Median gezeigt werden konnte ($p < 0,001$). Unter dieser Annahme ist es möglich, statt der Einzelanalysen eine Kollektivanalyse durchzuführen. Die Trends der Spätblüher konnten nun mit signifikant negativ bewertet werden ($p < 0,1$ bis $1,0$ d/Dekade), wohingegen positive Trends unspezifisch sind.

In einer weiteren Klimaanalyse wurde untersucht, ob das Verhalten der Frühblüher tatsächlich eine Folge steigender Temperaturen ist unter der Annahme, dass eine Erwärmung hauptsächlich in den Sommermonaten zu verzeichnen ist. Dazu wurden die Durchschnittstemperaturen

über zwei Monate vor dem ersten Tag der Monate Februar, April, Juni und August verglichen. Die Hypothese wurde nicht bestätigt, vielmehr stiegen die Mitteltemperaturen über zwei Monate vor dem 1. Februar fast dreimal so schnell an wie über zwei Monate vor dem 1. August (0.154 K/Dekade vs. 0.056 K/Dekade). Allerdings verschwand die Schneedecke nicht signifikant schneller, vielmehr verschieben sich vereinzelte Schneefälle verstärkt in die späten Frühjahrsmonate, was die Frühblüher vielleicht limitieren könnte.

3.3 Korrelationen der phänologischen Datensätze mit dem Klima

Von den beiden untersuchten Arten *Zea mays L.*, Mais, und *Brassica napus L.*, Raps, zeigt nur der Mais hohe Korrelationen mit dem Klimafaktor Temperatur (1995 – 2005: $p < 0,001$). Da Mais aber zu den C4-Pflanzen gezählt wird, ist dies nicht weiter verwunderlich. Der Raps zeigt zum Parameter „Temperatur“ eine schwache, nicht signifikante Gegenläufigkeit. Dieses Ergebnis für die Station München/Flughafen stimmt allerdings signifikant mit der des Naturraums „Neißgebiet“ überein, der gewählt wurde, um einen Föhneinfluss auszuschließen (Korrelationstest nach Spearman).

Zusätzlich wurde auf Korrelationen mit anderen Klimaparametern überprüft, explizit Schneeschmelze, Niederschlag und Sonnenscheindauer, allerdings konnten nur Zusammenhänge mit der Sonneneinstrahlung festgestellt werden, die allerdings signifikant mit der Temperatur korreliert.

Im Falle des Rapses zeigt sich also offenbar ein ähnlicher Fall wie bei *Primula elatior L.*, nämlich eine im Jahresverlauf verspätete Blüte bei steigender Temperatur, allerdings ohne solch starken Gegenzusammenhang wie bei der Schlüsselblume. Es exi-

stieren somit offenbar auch in der Landwirtschaft Pflanzenarten, deren Phänologie sich bei wechselnden Klimaparametern ändert.

3.4 Zusammenhang phänologischer Erscheinungen mit genomischer Artnähe

Das Alignment für ITS1 führte bei vier der 13 untersuchten Arten zu sehr hoher Übereinstimmung (82 %-98 %), in allen anderen Fällen lag allerdings der Identitätsscore zwischen 50 und 65 %, was eine sehr große Datenwolke zur Folge hatte. Alle Daten sind in Abb. 8 (siehe S. 52) aufgetragen, die Ordinate zeigt die Differenz der Trends

beider Pflanzen pro Dekade. Der lineare Trend ist derart durchaus zu erwarten, jedoch nicht signifikant ($p = 0,138$). Auch logarithmierte Identitätsscores verbessern das Ergebnis nicht. Diese ersten Resultate deuten allerdings darauf hin, dass dieser Ansatz vielversprechend ist, weshalb die bisherigen Ergebnisse hier präsentiert werden.

4 Diskussion

4.1 Methodik und Ergebnis

Durch die Verwendung von Herbar- und Pollenanalysen konnte gezeigt werden, dass eine Klimaveränderung signifikante Einflüsse auf die Blütezeit von Pflanzen

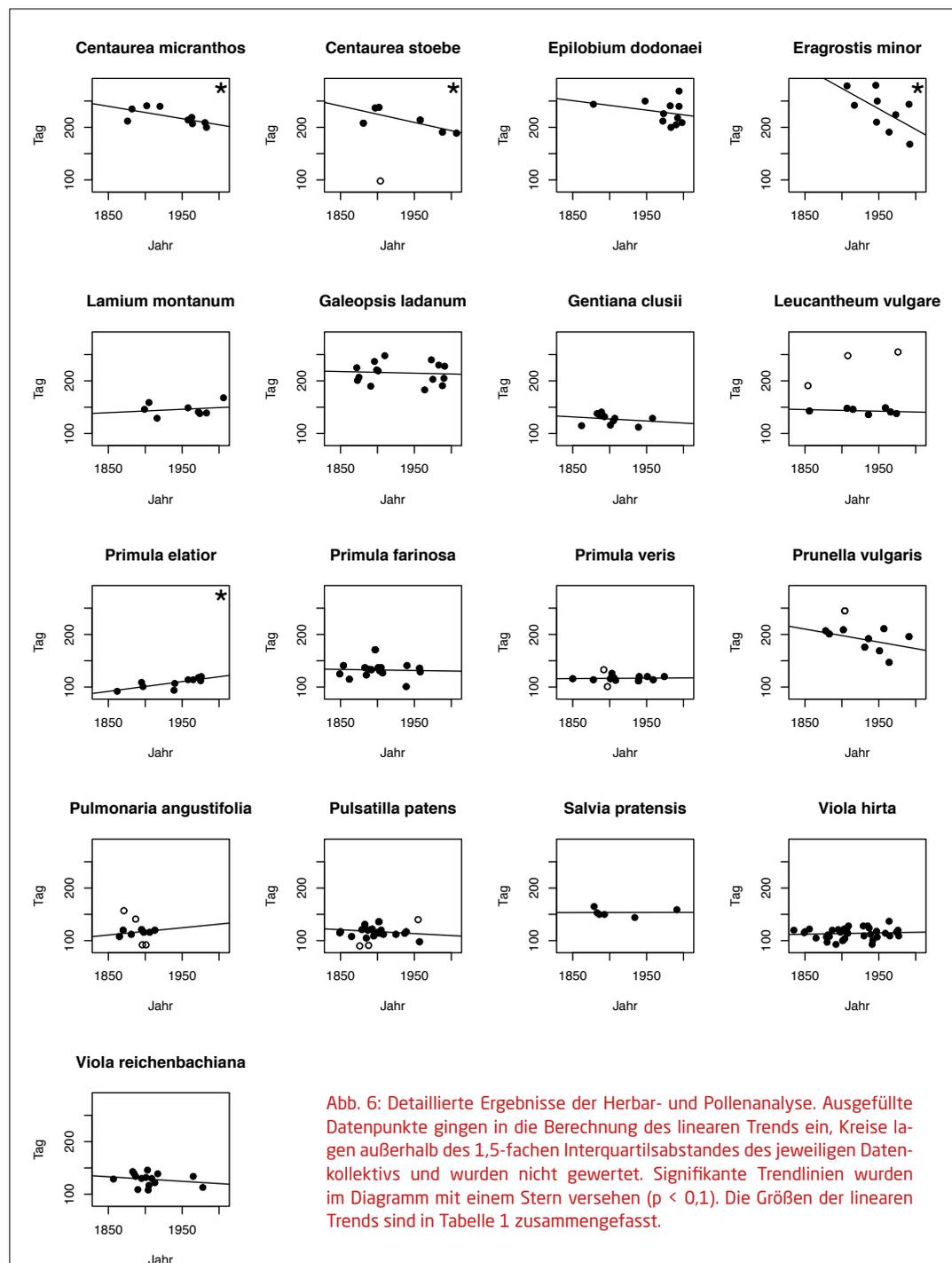


Abb. 6: Detaillierte Ergebnisse der Herbar- und Pollenanalyse. Ausgefüllte Datenpunkte gingen in die Berechnung des linearen Trends ein, Kreise lagen außerhalb des 1,5-fachen Interquartilsabstandes des jeweiligen Datenkollektivs und wurden nicht gewertet. Signifikante Trendlinien wurden im Diagramm mit einem Stern versehen ($p < 0,1$). Die Größen der linearen Trends sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

der Münchner Flora hat. Diese Methodik erlaubte es somit, den bisher möglichen Zeitraum in München um mehr als 120 Jahre bis 1835 auszudehnen. Entgegen der getroffenen Annahme, in jedem Fall eine verfrühte Blüte verzeichnen zu können, zeigt die vorliegende Arbeit zwar insgesamt eine verfrühte Pflanzenblüte bei steigender Temperatur, jedoch kann die Existenz positiver Trends nicht vernachlässigt werden. Es muss aber betont werden, dass die Datendichte je nach Pflanzenart zum Teil sehr stark schwankt und somit nicht jeder gemessene Trend die Realität wiedergibt. Beispielsweise nimmt zwischen ca. 1920 und 1935 die Anzahl an Belegen im Raum München sehr stark ab, wie *Lamium montanum* L. eindrucksvoll zeigt. Dieses Loch ist auch im Pollendatensatz von 1904 bis 1939 deutlich erkennbar. Daher eignet sich vorliegende kombinierte Arbeitsweise nur, wenn ansonsten eine hohe Datenmenge vorhanden ist, was in Deutschland wohl nur an wenigen Standorten realisiert werden könnte.

Doch selbst bei dieser Untersuchung der Münchner Stadtflora sind 13 der 17 verzeichneten Trends nicht signifikant. Dies kann mindestens drei Ursachen haben: (1) mehrere Parameter werden so verändert, dass die Gesamtsituation ein Gleichgewicht bildet und die Phänologie sich nicht ändert und/oder (2) es gibt Pflanzenarten, die nicht auf Klimaveränderungen reagieren und/oder (3) die Datengüte und -dichte ist mangelhaft. Für

einige der untersuchten Arten wie *Salvia pratensis* L. trifft der letzte Punkt durchaus zu. Jedoch zeigt gerade der signifikant positive Trend von *Primula elatior* L., dass spezifische Trends einer früher einsetzenden Wachstumsperiode durch pflanzenspezifische Reaktionen oder externe Störeinflüsse wie Bodenparameter etc. verwaschen werden können. Bezieht man die meteorologischen Datensätze mit ein, die eine eindeutige Erwärmung seit 1870 verzeichnen, so verwundern folglich nicht die negativen Trends. Bemerkenswert ist vielmehr, dass Gegenmechanismen existieren müssen, die zu positiven Trends wie bei der Schlüsselblume führen.

Mindestens ebenso bemerkenswert ist die oben genannte These, dass manche Arten nicht auf Klimaveränderungen reagieren. Dies mag sicherlich zum Teil auf mangelnde Datendichte zurückzuführen sein. Allerdings flossen bei 5 der 13 Pflanzenarten mit nicht signifikantem Trend jeweils mindestens 15 Herbarbelege in die Untersuchung ein. Somit liegt die Vermutung nahe, dass zwar der berechnete Trend der Blütetermine nicht signifikant ist, dies allerdings nicht zwangsläufig mit der Güte des Datensatzes zusammenhängt, sondern vielmehr einige Arten tatsächlich keine Reaktion auf Klimaveränderungen zeigen.

4.2 Rückführung positiver Trends auf weitere Umweltparameter

Die unerwartete Existenz signifikant positiver Trends legitimiert weitere argu-

mentative Überlegungen. Mehrere Ansätze scheinen plausibel:

(1) Es handelt sich um eine pflanzenspezifische Reaktion, bei der ein Set von Enzymen bei steigenden Temperaturen ihr Wirkungsmaximum überschreitet. Die Reaktionskinetik spezifischer Schlüsselenzyme wie RuBisCO unterscheidet sich dabei je nach Isoform und ist somit artspezifisch. Die Erkenntnisse aus dem Abschnitt 3.4 deuten darauf hin, sind jedoch noch nicht ausreichend belegt.

(2) Die Beobachtung ist nicht nur von der Pflanze, sondern auch von der Bodenbeschaffenheit abhängig. Es konnte in der Vergangenheit beobachtet werden, dass der gemeine Löwenzahn aus der Gattung *Taraxacum* auf zwei angrenzenden Wiesen, die unterschiedlicher Düngung unterliegen, eine voneinander verschiedene Blütezeit besitzt. Die Analyse von 18 Bohrproben mit einer definierten Länge von 0,4 m, was in etwa der Höhe des Oberbodenhorizontes entspricht, zeigte, dass sich beide Wiesen im Wesentlichen im pH-Wert und im Nährstoffgehalt unterschieden, wobei die Blüte auf dem Untergrund mit höherem pH und Nährstoffgehalt früher einsetzt. Hinzu kommt, dass eine Auflistung aller untersuchten Wildpflanzen nach Habitatansprüchen [20] einen Trend im Stickstoffgehalt der verschiedenen Bodenarten nahelegt, die Bodenfeuchtigkeit und die präferierte Sonneneinstrahlung sind statistisch ungerichtet auf positive

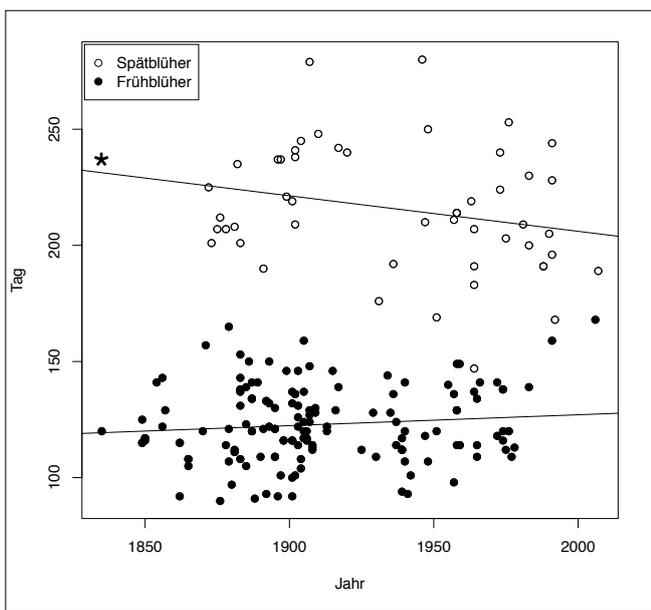


Abb. 7: Auftragung aller Datenpunkte aus Herbar- und Pollenanalyse. Deutlich zu erkennen sind vier Punktezentren. Daraus ergibt sich die Analyse zweier phänologischer Gruppen, den früh- und spätblühenden Pflanzen. Der lineare Trend durch die Spätblüher, gekennzeichnet mit einem Stern, ist signifikant ($p < 0.1$).

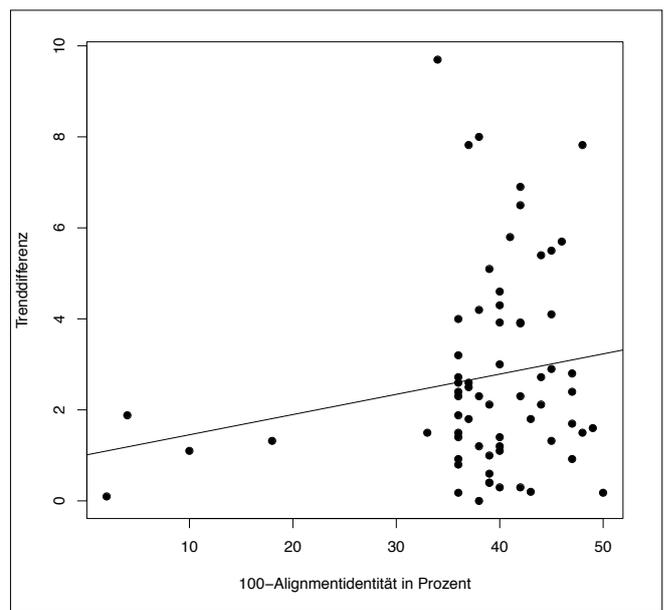


Abb. 8: Genidentität von ITS1 (Internal Transcribed Spacer 1) gegen Differenz der Zehnjahrestrends der Pflanzenblüte. Die Abszissenwerte wurden modifiziert (100-Score), sodass ein kleinerer x-Wert eine höhere Alignmentidentität bedeutet. Die meisten Werte liegen zwischen 50% und 65% Identität, sodass die Datenwolke am rechten Rand äußerst unspezifisch ist.

und negative Trends verteilt. Pflanzenarten mit positiven Trends bevorzugen dabei lehmige, somit relativ basische und nährstoffreiche Böden, deren pH stärker schwanken kann, Pflanzenarten mit negativen Trends eher sandige, somit relativ sauer und nährstoffarme Böden mit geringerer pH-Amplitude.

Wie im fünften Bericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [8] beschrieben, beobachtet man weltweit eine verstärkte Acidität des Bodens durch direkte oder indirekte anthropogene Einträge. In Anbetracht dessen könnte es auch hier wie bei (1) zu einer Schwellenüberschreitung von *Primula elatior* L. gekommen sein, sodass die gegenläufigen Entwicklungen der verfrüht einsetzenden Vegetationsperiode die für das Wachstum der Schlüsselblume negative Bodenentwicklung nicht kompensieren kann.

5 Abschließende Bemerkungen

Die in dieser Arbeit verwendete Methodik, eine Synopse von Herbar- und Wild-

bienendaten, bietet gerade in urbanen Räumen Vorteile gegenüber den zumeist verwendeten Aufzeichnungen der Blütezeitpunkte. Doch eignet sich eine Etablierung derartiger Untersuchungen nur für Städte mit einer großen Dichte an Sammelbelegen. Die Ergebnisse dieser Arbeit widersprechen weitestgehend nicht der vorausgegangenen Hypothese, dass durch den Klimawandel eine früher eintretende Pflanzenblüte zu verzeichnen ist. Jedoch soll deutlich auf die Pflanzenarten hingewiesen werden, die einen trotz Erwärmung verspäteten oder gleichbleibenden Blüetermin zeigen. Das deutet darauf hin, dass es Arten gibt, die nicht oder anders als erwartet auf eine Klimaveränderung reagieren. Diese Beobachtung muss an anderen Orten für entsprechende Arten verifiziert werden. Das betrachtete Ökosystem ist zu komplex, als dass mit Gewissheit eine Antwort darauf gefunden werden kann, wieso keine oder positiven Trends beobachtet werden können. In Anbetracht der Tatsache, dass das Klima nicht nur die Phänologie von Wildpflanzen verändert,

sondern auch für die Welternährung wichtige Nutzpflanzen wie *Zea mays* L. betroffen sind, ist es ein dringendes Anliegen, die Mechanismen hinter dieser scheinbar paradoxen Erscheinung zu verstehen.

Danksagung

Ohne die Grundsteine, die Dr. Franz Schuhwerk von der botanischen Staatssammlung München gelegt hat, wäre dieses Projekt nicht möglich gewesen, ich danke ihm dafür sehr herzlich. Auch danke ich Dr. Schmidt und Herrn Schuberth, die mich in das Arbeiten an der zoologischen Staatssammlung eingeführt haben. Zudem gilt großer Dank den zuständigen Lehrkräften meiner ehemaligen Schule, dem Johannes-Gutenberg-Gymnasium Waldkirchen, die mich in vielerlei Hinsicht unterstützt haben.

Quellenverzeichnis

- [1] Baldwin, BG: Phylogenetic utility of the internal transcribed spacers of nuclear ribosomal DNA in plants: An Example from the compositae. *Molecular Phylogenetics and Evolution* 1992; 1,1: 3-16
- [2] Beug, Hans-Jürgen: Leitfaden der Pollenbestimmung für Mitteleuropa und angrenzende Gebiete, München 2004
- [3] Bruse M. ENVI-met 3.1 Beta, 2008; <http://www.envi-met.com/>
- [4] Deutscher Wetterdienst: Deutsches meteorologisches Jahrbuch der Bundesrepublik Deutschland, Offenbach am Main
- [5] Dixon WJ, Mood AM: The statistical sign test. *J.Amer.Statist.Assoc.* 1996; 41: 557-566
- [6] Fitter AH, Fitter RSR. Rapid Changes in Flowering Time in British Plants. *Science* 2002; 296: 1689 – 1690
- [7] Gebhardt H, Glaser R, Radtke U, Reuber P. Geografie. Physische Geografie und Humangeografie, Heidelberg 2007
- [8] Parry ML, Canziani OF, Palutikof JP, van der Linden PJ und Hanson CE (eds): Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability.* Cambridge 2007
- [9] Keeling CD, Chin FJS, Whorf TP: Increased activity of northern vegetation inferred from atmospheric CO₂ measurements. *Nature* 1996, 382:146-149
- [10] Martins L, Oberprieler C, Hellwig FH: A Phylogenetic analysis of Primulaceae s.l. based on internal transcribed spacer (ITS) DNA sequence data. *Plant Syst. Evol.* 2003; 237: 75-85
- [11] Menzel A, Estrella N, Fabian P. Spatial and temporal variability of the phenological seasons in Germany from 1951 to 1996. *Blackwell Science Ltd.*, 2001; *Global Change Biology*, 7: 657-666
- [12] Myeni RB, Keeling CD, Tucker CJ, Asrar G, Nemani RR. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature* 1997, 386: 698-702
- [13] Parmesan C, Yohe, G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature* 2003; 421: 37 ff.
- [14] Root TL, Price JT, Hall KR, Schneider SH, Rosenzweig C, Pounds JA. Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature* 2003; 421: 57-60
- [15] Schönfelder P, Bresinsky A: Verbreitungsatlas der Farn- und Blütenpflanzen Bayerns. Stuttgart 1990
- [16] <http://www.ebi.ac.uk/embl/>: 29. Dezember 2011, European Bioinformatics Institute, EMBL Nucleotide Sequence Database
- [17] <http://www.fnp-muenchen.de/index.html>: 20. Januar 2009, Referat für Stadtplanung und Bauordnung der Landeshauptstadt München, Digitaler Flächennutzungsplan der Landeshauptstadt München
- [18] <http://www.merlyn.demon.co.uk/zeller-c.htm>: 23. Juli 2010, The Calendrical Works of Rektor Chr. Zeller: The Day-of-Week and Easter Formulae
- [19] http://www.muenchen.de/Stadtleben/Gesundheit_Umwelt/Umweltinfos/Umweltdaten/luft/145833/index.html: 13. Februar 2009, Landeshauptstadt München, Referat für Gesundheit und Umwelt, Mittlere klimatische Verhältnisse im Münchner Raum
- [20] <http://statedv.boku.ac.at/zeigerwerte/>: 11. April 2009, Universität für Bodenkultur Wien, Ökologische Zeigerwerte