



Verbundprojekt „Klimawandel und Gesundheit“

Schlussbericht zum Forschungsvorhaben

Effekt des Klimawandels auf Pollen in Bayern: KLIMApollen



finanziert durch
Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Verbraucherschutz



und durch
Bayerisches Staatsministerium für
Gesundheit und Pflege



Schlussbericht

Projektname:	Effekt des Klimawandels auf Pollen in Bayern: KLIMApollen
Akronym:	KLIMApollen
Aktenzeichen:	71a-U8729-2015/57-324
Projektlaufzeit:	01.08.2018 – 31.05.2021
Projektleitung:	Prof. Dr. Jörg Durner Technische Universität München (TUM)
Projektantragsteller:	Prof. Dr. Jörg Durner, Lehrstuhl für Biochemische Pflanzenpathologie (TUM) Prof Dr. Annette Menzel, Lehrstuhl für Ökoklimatologie (TUM) Prof. Dr. Jeroen Buters, Zentrum Allergie und Umwelt (ZAUM), Klinikum rechts der Isar der TUM (MRI)
Projektpartner:	Prof. Dr. Sabine Timpf, Professur für Geoinformatik, Universität Augsburg Prof. Dr. Karl Christian Bergmann, Stiftung Deutscher Pollenfluginformationsdienst (PID) Dr. Stephan Hartmann, Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) Prof. Dr. Jörg-Peter Schnitzler, Helmholtz Zentrum München – Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt GmbH
Versionsnummer:	Version 3 vom 6.12.2021

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung.....	5
2	Hintergrund und Zielsetzung	5
3	Herangehensweise und Ergebnisse.....	8
3.1	Zusammensetzung des Projektverbunds.....	8
3.2	Vorgehensweise im Verbund	8
4	Modellierung der Pollen-Allergie-Relationen (Teilprojekt 1).....	9
4.1	Material und Methoden	10
4.1.1	Datenerfassung und analysierte Daten.....	10
4.1.2	Prädiktive Modellvariablen.....	12
4.1.3	Langzeitanalyse der Pollen- Klimazeitreihen	13
4.2	Ergebnisse und Diskussion.....	17
4.2.1	Langzeit-Analyse von Klimaparametern für Bayern.....	17
4.2.2	Langzeit-Analyse von Pollenflug-Zeitreihen.....	18
4.2.3	Verhältnis zwischen Veränderungen im Pollenflug und Klimaparametern	19
4.2.4	Modellierung von Speziesverteilung für Birke und Gräser.....	20
4.2.5	Modellierung der Pollenflugintensität	21
4.2.6	Modellierung der phänologischen Parameter und des Allergierisikos	24
4.2.7	Zukunftsprojektionen und Schlussfolgerungen	28
5	Einfluss des Klimawandels und der Landnutzung auf den blüh- und pollenphänologischen Kalender in Bayern (Teilprojekt 2).....	9
5.1	Pollentransportklimatologie für Bayern	33
5.1.1	Daten & Methoden	34
5.1.2	Ergebnisse	35
5.2	Verlängerung der Erlen-Pollensaison durch Ferntransport.....	38
5.2.1	Daten & Methoden	39
5.2.2	Ergebnisse	39
5.3	Landnutzung und Gräser-Pollenemissionen in Bayern.....	41
5.3.1	Daten & Methoden	41
5.3.2	Ergebnisse	42
5.4	Zweigmethode für Untersuchungen von Polleneigenschaften.....	44
5.4.1	Methode	45

5.4.2	Ergebnisse	47
6	Einfluss des Klimawandels auf die Allergenität von Pollen (Teilprojekt 3)	49
6.1	Material und Methoden	49
6.1.1	Experimente mit allergenen Pflanzen	49
6.1.2	Molekularbiologische und biochemische Analyse des allergenen Potentials	51
6.2	Ergebnisse	52
6.2.1	Einfluss von erhöhten Temperaturen im Frühjahr auf die Blühphänologie sowie das allergene Potential von Birke	52
6.2.2	Allergenes Potential von Birkenpollen unter erhöhten Frühjahrstemperaturen	54
6.2.3	Wachstum und Phänologie von <i>Ambrosia</i> unter künftigen Klima- und Umweltbedingungen für zwei Regionen in Bayern.....	58
6.2.4	Molekularbiologische und biochemische Bestimmung des allergenen Potentials von <i>Ambrosia</i> -Pollen	60
7	Zusammenfassende Diskussion der Ergebnisse zum Einfluss des Klimawandels auf Pollen	65
7.1	Experimentelle Simulationen künftiger Klimabedingungen.....	65
7.2	Modellierte Szenarien künftiger Klimabedingungen.....	66
8	Darstellung des Nutzens im Rahmen der Bayerischen Klimaanpassungsstrategie.....	67
9	Glossar	69
10	Literaturverzeichnis.....	74
11	Anlagen.....	81
11.1	Liste der Pollenmessstationen	81
11.2	Meilensteine (lt. Bewilligungsschreiben vom 18.07.2018)	82
11.3	Publikationen in Fachzeitschriften.....	83
11.3.1	Öffentlich frei verfügbare Publikationen (open access)	83
11.3.2	Öffentlich nicht frei verfügbare Publikationen	84
11.3.3	Veröffentlichungen in Vorbereitung.....	84
11.3.4	Weitere Veröffentlichungen - indirekte Resultate.....	85
11.4	Tagungsbeiträge (Poster, Talks).....	85
11.5	Abschlussberichte des externen Partners LfL.....	85
12	PDFs der Veröffentlichungen und Berichte aus Kapitel 11.3 bzw. 11.5	86

1 Zusammenfassung

Der bereits messbare Klimawandel in Bayern beeinflusst die Vegetation einschließlich allergener Pflanzen. Um die Auswirkung künftiger, für Bayern relevanter Klimaszenarien auf die Pollenallergenität zu untersuchen, wurden in dem Verbundprojekt „KLIMApollen“ experimentelle und Modellierungsansätze verwendet.

Die Analysen historischer Zeitreihen und die Einbeziehung neuester Klimaprojektionen zeigten, dass sich die Exposition gegenüber Birken- und Gräserpollen geändert hat und weiter ändern wird. Demnach wird in unterschiedlichen Regionen Bayerns die Pollenbelastung durch Birke mehrheitlich abnehmen, während für Gräserpollen generell eine Zunahme angenommen werden muss. Pollentransportklimatologien zeigten, dass Pollenferntransport einen überraschend großen Anteil beim früheren Einsetzen der Pollensaison vieler allergener Pflanzenarten hat. Speziell für Gräserpollen spielen die Art der Landnutzung (Futtergräser, häufiger/seltener Schnitt) und somit lokale Gegebenheiten bei den freigesetzten Mengen an Gräserpollen eine große Rolle.

Untersuchungen an unterschiedlichen Modellpflanzen zeigten, dass verfrühte Blühzeitpunkte keine Änderung auf die Allergenität der untersuchten Pollen hatten. Dagegen können pflanzenspezifische Stressfaktoren die Allergenität der Pollen beeinflussen. Dabei spielt eher eine Abweichung von Temperaturoptima der jeweiligen Pflanzenart als Temperaturerhöhungen per se eine Rolle. Stickoxide erhöhten bei *Ambrosia* das allergene Potential und sollten in Hinblick auf Allergiker weiter reduziert werden.

Schlussfolgernd zeigen die Analysen der Pollendaten aus der Vergangenheit, dass der Klimawandel bereits einen Einfluss auf die Exposition gegenüber Pollen und damit auf die Gesundheit der Bürger hat. Es werden sich künftig weitere regionale Änderungen der Pollenarten und –mengen in Bayern ergeben. Aufgrund des Ferntransports sollte gerade zu Beginn der Pollensaison die Rolle lokaler Pollenquellen (Blüte) mit Vorsicht bewertet werden. Regionale aufgelöste Karten der Pollenverteilung für unterschiedliche Annahmen zukünftiger Klimaveränderungen, wie sie mit der entwickelten webbasierten Applikation (<https://geoserver.geo.uni-augsburg.de/klimapollen/>) zur Verfügung gestellt werden, ermöglichen erste Einschätzungen zu regionalen zukünftigen Entwicklungen der Pollenexposition. Sämtliche Daten der Modellierungen und Versuche zur Pollenallergenität stehen für die Erstellung detaillierter Karten der Pollenbelastung zur Verfügung und sollten in regelmäßigen Abstand durch aktuelle Daten zu Klima und Pollenmengen ergänzt werden.

2 Hintergrund und Zielsetzung

Der bereits messbare Klimawandel in Bayern wird sich künftig weiter verstärken [1], insbesondere wenn es nicht gelingt, durch geeignete Maßnahmen gegenzusteuern [2]. Vermehrt rücken neben umweltrelevanten auch gesundheitliche Risiken durch den Klimawandel in den gesellschaftlichen und politischen Fokus [1, 3]. Hierzu zählen Pollenallergien, die indirekt durch den Klimawandel beeinflusst werden. Etwa 25% der bayerischen Bevölkerung ist hauptsächlich gegen Pollen allergisch mit steigender Tendenz [4]. Der Pollenflug korreliert direkt mit den

allergischen Symptomen [5] und allergische Erkrankungen verursachen eine wesentliche finanzielle Belastung für das Gesundheitssystem - in Bayern etwa 600Mio €/Jahr [6]. Zusätzlich ist eine höhere Pollenbelastung kausal verbunden mit mehr neuen allergischen Sensibilisierungen, d.h. bei steigender Pollenbelastung wird neben der Symptomatik auch die Anzahl an Allergikern in Bayern zunehmen [7, 8]. Ein weiterer Einfluss des Klimawandels auf allergische Erkrankungen in Bayern ist also zu erwarten.

Daher ist es notwendig, auf die langfristigen Folgen des Klimawandels aufmerksam zu machen und Vermeidungsstrategien von allergener Pollenemission sowie –exposition in der Prävention zu forcieren. Gerade für Bayern ist dies essentiell: wegen der guten Luftqualität und geringeren Pollenbelastung kommen neben Touristen auch gezielt Patienten mit Atemwegsbeschwerden in die bayerische Alpenregion. Deshalb muss aus Vorsorgegründen der Einfluss des bisherigen und zukünftigen Klimawandels auf die regionalen Pollenkalender erfasst werden, um auch in Zukunft geeignete „Rückzugsgebiete“ identifizieren zu können. Gerade im Alpenraum sind jedoch die Abschätzung der bisherigen und zukünftigen Änderungen aufgrund der ausgeprägten Topographie und der hohen Erwärmungsraten nicht einfach [9].

Eine umfassende und detaillierte Abschätzung über die künftige Pollenbelastung in Bayern besonders in Hinblick auf den Klimawandel existiert bislang nicht. Bisherige Forschung zum Einfluss des Klimawandels auf Pollen in Bayern beziehen sich auf einzelne Pollenspezies wie z.B. Pollen von Buche [10], Olive und *Ambrosia* [11, 12]. Für Projektionen künftiger Pollenbelastungen, die insbesondere für Allergiker wichtige Informationen zur Vermeidung oder Prävention beinhalten, müssen komplexe Faktoren berücksichtigt werden.

Der Klimawandel führt zu einer früheren, längeren, möglicherweise intensiveren Pollensaison (Pollenproduktion pro Pflanze, Anzahl und Verbreitung der Pflanzen, Dauer der Pollenfreisetzung), fördert invasive Arten mit allergenem Potential und erhöht die Allergenität der Pollen [13, 14]. Die steuernden Faktoren stehen zum großen Teil im Zusammenhang mit dem Klimawandel [8, 15, 16]. So sind die Blühzeitpunkte im Wesentlichen temperaturgesteuert. Allerdings ist unklar, ob wind- oder insektenbestäubte Arten höhere Temperatursensitivitäten aufweisen [17]. Aufgrund mangelnder Winterkälte könnten sich in Zukunft Blühtermine von Pionierarten wie Hasel oder Erle nicht mehr so stark verfrühen, was Prognosen erschwert [18]. Gerade im Alpenraum mit einer doppelt so hohen Erwärmungsrate wie im Flachland [19] könnten sich größere Verschiebungen in Beginn und Dauer der Pollensaison oder von Pflanzenarealen ergeben. Aufgrund häufigerer und extremerer Wetterereignisse (Störungen) im Zuge des Klimawandels könnte die Häufigkeit / Abundanz von Pionierarten wie Hasel und Birke u.U. stark zunehmen. Oft übersehen wird, dass durch Änderungen in der Grünlandbewirtschaftung und Landnutzung, auch als Anpassungsreaktion auf den Klimawandel, sich ebenfalls Änderungen in der Grasallergenemission ergeben könnten [20].

Neben diesen direkt durch Klimaveränderungen verursachten Effekten, können weitere Umweltparameter wie Luftschadstoffe die Pollenproduktion und -allergenität beeinflussen. Höhere CO₂-Konzentrationen führen zu verstärkter Blüte und damit höheren Pollenkonzentrationen [17], die Allergenität der Pollen wird durch manche Luftschadstoffe erhöht [21, 22]. Faktoren wie z.B. Trockenheit, Ozon, UV-Strahlung und anthropogene Luftschadstoffe wirken als Stressfaktoren, auf die Pflanzen mit Veränderungen in Protein und Metabolitmustern

reagieren, die die Allergenität von Pollen beeinflussen [23]. Allergene sind häufig Stressproteine, die zusammen mit immunologisch aktiven Begleitstoffen die Allergenität von Pollen bedingen [24, 25].

Um die Auswirkung künftiger, für Bayern relevanter Klimaszenarien auf Pollen und ihre Allergenität zu untersuchen und die Komplexität der Wechselwirkungen mit weiteren Faktoren zu verstehen, wurden im Projekt KLIMApollen zwei komplementäre Ansätze verfolgt.

1. Durch **Modellierung** wurden Klimabedingungen und Umweltbedingungen wie Landnutzung einbezogen, um Pollenbildung und –transport zu simulieren. Damit wurde die Grundlage geschaffen, um die zu erwartenden Pollenzusammensetzungen und –mengen in Zukunft lokal projektieren zu können.
2. Durch **experimentelle Umweltsimulation** wurden Modellpflanzen (*Ambrosia*, Birke, Hasel, Erle, Pappel) in Experimenten künftigen Klimaszenarien ausgesetzt, um im Detail zu verstehen, welchen Einfluss Umweltbedingungen auf Pollenproduktion (Menge) und Allergenpotential (Qualität) haben.

Das übergeordnete **Projektziel** war es, die aufgrund des Klimawandels zu erwartenden, künftigen Pollenbelastungen in Bayern darzustellen - basierend auf Änderungen der Artenzusammensetzung, Menge und Allergenität von Pollen. Dabei wurde auch modelliert, ob sich die Anzahl von Allergie-Symptom-Risikotagen oberhalb eines Schwellenwertes verändern wird. Dazu wurden vorhandene Klimaprojektionen als Grundlage für Modellierungen und Experimente verwendet. Die Ergebnisse sollen als Basis für die Bereitstellung detaillierter Information für Entscheidungsträger und die Öffentlichkeit dienen.

Ziele innerhalb der drei Teilprojekte sind nachfolgend zusammengefasst und in den entsprechenden Kapiteln 4 bis 6 ausführlicher präzisiert:

- Ziel des Teilprojekts 1 (Kapitel 4) war es, auf der Basis heutiger (elektronisches Polleninformationsnetzwerk, ePIN) und historischer (Stiftung Deutscher Polleninformationsdienst, PID) Messungen der Pollenkonzentrationen die Faktoren (z. B. Temperatur, CO₂) quantitativ zu modellieren, die die Pollenkurve in Bayern bestimmen. Damit können, basierend auf Klimaprojektionen, künftige Pollenkurven simuliert werden. Für allergene Pollen wurde auch die damit verbundene Allergiesymptomatik simuliert (eine veränderte Pollenbelastung resultiert in einer anderen Symptomatik).
- Ziel des Teilprojekts 2 (Kapitel 5) war es, den Einfluss des Klimawandels und von Landnutzungsänderungen auf den blüh- und pollenphänologischen Kalender in Bayern regional zu beschreiben.
- Ziel des Teilprojekts 3 (Kapitel 6) war es, die Allergenität von Pollen unter künftigen Klima- und Umweltbedingungen zu charakterisieren.

3 Herangehensweise und Ergebnisse

3.1 Zusammensetzung des Projektverbunds

KLIMApollen erarbeitete die Ergebnisse im Verbund von drei Teilprojekten unterschiedlicher Disziplinen.

In Zusammenarbeit des Zentrums Allergie und Umwelt (ZAUM) mit dem Deutschen Polleinformativdienst (PID) und der Universität Augsburg wurden in TP1 vorhandene Pollensymptomdaten und Klimadaten verwendet, um regionale Pollen- und Allergierisiken für die Vergangenheit zu quantifizieren und für die Zukunft zu modellieren und eine interaktive Karte in Form einer App zu erstellen [15, 26-28].

Die Professur für Ökostatistik der Technischen Universität München nutzte räumlich-zeitliche Daten zu Pollenmengen, Phänologie und, in Kooperation mit der Landesanstalt für Landwirtschaft [LfL], zu Blüh- und Schnittterminen im Grünland [20, 29-31], um Auswirkungen von Landnutzungs- und Klimawandelbedingungen auf die Pollenentwicklung durch Modellierung detailliert darzustellen. TP2 entwickelte außerdem die Zweigmethode [30] als Instrument zur Pollengewinnung und – analyse weiter.

Der Lehrstuhl für Biochemische Pflanzenpathologie nutzte Experimente am Helmholtzzentrum München auf der Basis experimenteller Umweltsimulation, um die Allergenität von Birken- und *Ambrosia*-Pollen unter Klimawandelbedingungen zu charakterisieren [22, 32-34].

Synergien im Verbund ergaben sich aus der gemeinsamen Nutzung von Daten und Versuchen. Dies erst ermöglichte die Synthese der Ergebnisse, um die komplexen Faktoren bei der Projektion künftiger Pollenbelastungen abzudecken.

3.2 Vorgehensweise im Verbund

Um die Auswirkung künftiger, für Bayern relevanter Klimaszenarien auf die Pollenallergenität zu untersuchen, wurden gemeinsame Klimawandelszenarien vereinbart sowie experimentelle und Modellierungsansätze verwendet.

1. Modellierungsansätze: Unter Einbeziehung künftiger Klimabedingungen und Vegetationsänderungen wurden die zu erwartenden Pollenkurven und –mengen für den Zeitraum 2000 bis 2085 modelliert und ein Pollenkalender erstellt. Die Ergebnisse sollten in Allergie-Symptomkurven überführt werden. Der Einfluss von Änderungen in der Landnutzung im Klimawandel wurde untersucht, um Einflussfaktoren auf die Artenzusammensetzung der Pollen sowie auch deren anteilige Mengen vertieft zu verstehen.

2. Kontrollierte Versuche mit Modellpflanzen (*Ambrosia*, Birke, Hasel, Erle, Pappel) wurden durchgeführt, um im Detail zu verstehen, welchen Einfluss künftig zu erwartende Umweltbedingungen auf die Pollenproduktion (Menge der Pollen und Blühdauer) und das Allergenpotential (Qualität der Pollen) haben. Ziel der experimentellen Simulation in Pflanzenversuchen war es, die Auswirkungen von Klimawandel auf Eigenschaften allergener Pflanzen untersuchen zu können. Dazu nutzten wir unterschiedlich komplexe Versuchssysteme. Wir waren mit der Phytotronanlage am Helmholtzzentrum München in der Lage, programmierbare

und damit hochkontrollierte Bedingungen (natürliche Lichtqualität, Luftfeuchte, Gasatmosphäre) für Pflanzenversuche mit *Ambrosia* zu schaffen unter heutigen und künftigen Bedingungen und zudem mit einer hochallergenen Pflanze, die aus gesundheitlichen Gründen nicht gezielt im Freiland oder Gewächshaus zum Blühen gebracht werden kann (siehe Abschnitt 6.1.1.2). Für größere Pflanzen wie Birken wurden Experimente mit getopften Pflanzen im Gewächshaus (siehe Abschnitt 6.1.1.1) und Zweigexperimente in Klimakammern (siehe Abschnitt 5.4.1) durchgeführt, und jeweils mit Pflanzen, bzw. Zweigen verglichen, die im Freiland verblieben waren.

Anhand von Meilensteinen (siehe *Anhang 11.2*) wurde die Einhaltung der Projektziele überprüft. Die Ergebnisse der drei Teilprojekte werden in Kapiteln 4, 5 und 6 dargestellt und zusammenfassend diskutiert (Kapitel 7). Auf die Meilensteine wird im Text verwiesen.

4 Modellierung der Pollen-Allergie-Relationen (Teilprojekt 1)

Hauptziel von TP1 war es, die durch den prognostizierten Klimawandel hervorgerufenen Veränderungen von Pollenmenge und Pollenflugzeit in Bayern zu projizieren, auf Karten zu übertragen und die Ergebnisse in Form von expliziten regionalen und zeitlichen Darstellungen des Pollenflugs der Öffentlichkeit zur Verfügung zu stellen.

Dieses Ziel wurde in folgenden Schritten erreicht:

- Auswahl der gemeinsam verwendeten Klimawandelszenarien basierend auf RCP 2.6, RCP 4.5, und RCP 8.5 (siehe Glossar) [2] für Birken- und Gräserpollen in Übereinstimmung mit TP2 und TP3 (*M1, Anhang 11.2*).
- Modellierung der Verteilung von Birken und Flächen mit Grasbewuchs in Bayern (Allergenquellen).
- Entwicklung phänologischer Modelle, die den Beginn, das Ende, den Höhepunkt und die Länge der Pollensaison von Birken und Gräsern beschreiben.
- Entwicklung von Modellen für die Pollenproduktion.
- Berechnung der bisherigen Auswirkungen des Klimawandels auf den Pollenflug anhand der vorhandenen Pollenflugzeitreihen des PID (Stiftung Deutscher Polleninformationsdienst) und Pollenflugdaten des ZAUM (publiziert in [35]).
- Darstellung der Klimaveränderungen in Bayern bis heute, Extrapolation in die Zukunft sowie Abschätzung, ob Veränderungen der Pollenexposition zu Veränderungen der Allergie-Symptom-Tage führen wird.
- Visualisierung der Daten anhand einer interaktiven Karte im Internet.

Für weitere Details zur Vorgehensweise siehe Rojo et al. 2021 [35].

4.1 Material und Methoden

4.1.1 Datenerfassung und analysierte Daten

4.1.1.1 Pollendaten und Zeitreihen

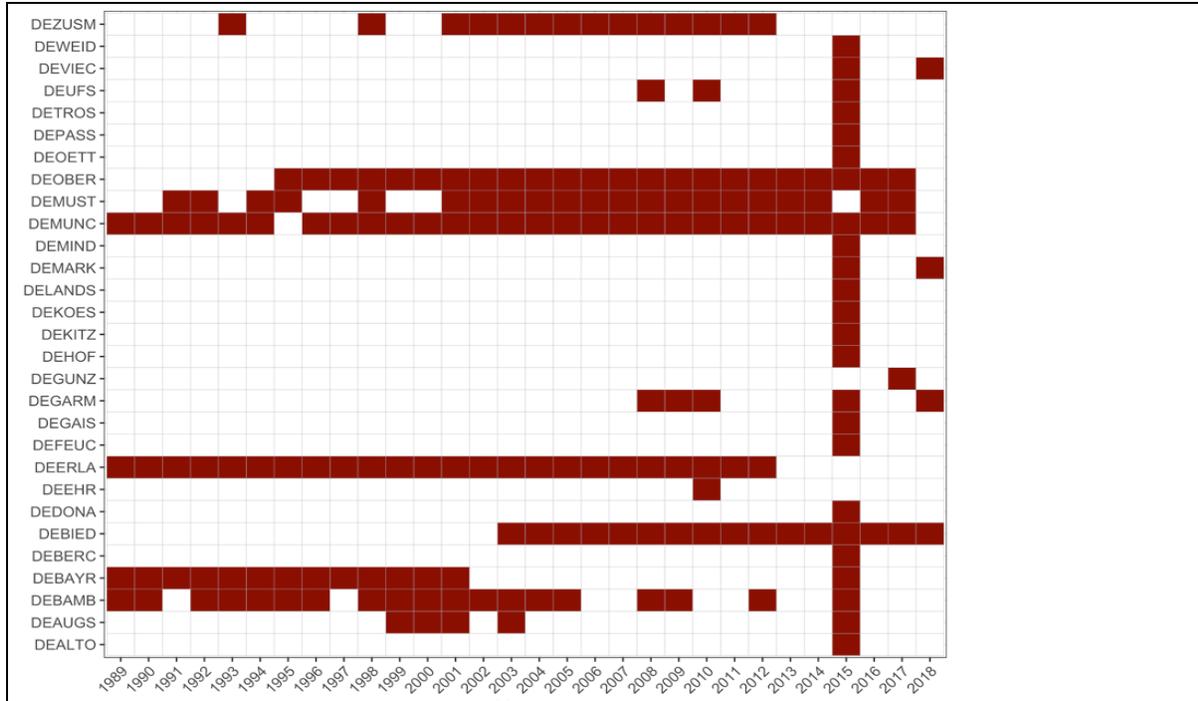


Abb. 4.1: Verfügbarkeit von Pollendaten für die Studie. Rote Felder sind Jahre und Stationen (maximal 29 Stationen), für die Pollenflugdaten vorhanden sind. Abkürzungen : DEALTO Altötting, DELANDS Landshut, DEAUGS Augsburg, DEMARK Markttheidenfeld, DEBAMB Bamberg, DEMIND Mindelheim, DEBAYR Bayreuth, DEMUNC München Thalkirchnerstrasse, DEBERC Berchtesgaden, DEMUST Münnerstadt, DEBIED München Biederstein, DEOETT Öttingen, DEDONA Donaustauf, DEPASS Passau, DEERLA Erlangen, DEPFRO Pfronten, DEFEUC Feuch, DETROS Trostberg, DEGAIS Gaisach, DEUFS2 Schneefernerhaus, DEGARM Garmisch-Partenkirchen, DEVIEC Viechtach, DEHOF Hof, DEWEID Weiden, DEKITZ Kitzingen, DEZUSM Zusmarshausen, DEKOES Kösching (siehe auch Tabelle in *Anhang 11.1*).

Die verwendeten Pollendaten umfassten alle in Bayern vorhandenen Daten, die hauptsächlich von ZAUM und PID, mittels volumetrischer Fallen vom Hirst-Typ [36] an 29 Messstandorten erhoben wurden, die über das Bundesland verteilt waren (Abb.4.1). Eine Messstation (DEMUNC) lieferte über einen Zeitraum von 1989 bis 2018 nahezu durchgehend Daten, andere über kürzere Zeiträume. Die meisten Messstationen liefen gemeinsam im Jahr 2015 unter homogenen Bedingungen [37], d.h. 1) auf einer ebenen und horizontalen Fläche, 2) in einer Höhe von 9-15 m über dem Boden (auf einem Dach), 3) an einem Standort, der von allen Seiten frei anströmbar war, ohne höhere, den Fallenstandort überragende Gebäude in einem Umkreis von 200 m, 4) mindestens 2 m von der Gebäudekante entfernt und 5) mit einem Pollenmessgerät, das 150 cm über dem Dach angebracht ist, entsprechend den Mindestempfehlungen für das Pollenmonitoring [38]. Alle Pollendaten wurden als Tagesmittelwerte (jeweils von Mitternacht bis Mitternacht) in Pollenkörner/m³ Luft erfasst. Die entnommenen Messtrommeln aus den homogenen Messungen im Jahr 2015 wurden in einem zentralen Labor aufbereitet, um Heterogenität zu vermeiden. Die Messtrommeln der Stationen mit den langen Messreihen (bis

zu 30 Jahre) wurden stets in den Laboren vor Ort aufbereitet. Die mikroskopische Pollenanalyse wurde dezentral und in Anlehnung an die Technische Regel (DIN CEN/TS-16868, 2015) durchgeführt [39].

Mehrere beschreibende Parameter der Pollensaison wurden berechnet und als abhängige Variablen in den im Rahmen des aktuellen Projekts entwickelten Modellen verwendet. Diese Intensitätsparameter sind:

- Beginn der Pollensaison. Als der Tag des Jahres, an dem das jährliche Pollenintegral einen Wert von 2,5 % erreicht hat.
- Höhepunkt der Pollensaison. Als der Tag im Jahr, an dem die höchste Pollenkonzentration innerhalb eines 24 h-Zeitraums erreicht wird.
- Ende der Pollensaison. Als der Tag des Jahres, an dem das jährliche Pollenintegral einen Wert von 97,5 % erreicht hat.
- Länge der Pollensaison. Die Anzahl der Tage zwischen dem Beginn und dem Ende der Pollensaison.
- Anzahl der Tage mit Pollenkonzentration > Schwellenwert. Für Gräser 50 Pollen/m³ und für Birke 100 Pollen/m³ [40].
- Jährliches Pollenintegral. Als Summe der täglichen Pollenkonzentrationen während der Pollensaison. Dieser Intensitätsparameter ist aus mehreren einzelnen Parametern zusammengesetzt: täglich >10 Pollen/m³, >20 Pollen/m³ etc. (siehe Abb 14.3A).

Nicht berücksichtigt wurden Veränderungen der CO₂-, PM10- und NO₂-Werte (M4), da diese zu klein und zu schleichend sind, um sie quantifizieren zu können, insbesondere vor dem Hintergrund sehr stark variabler jährlicher Pollenbelastungen und Temperaturverläufe. Das wird verständlich wenn man bedenkt, dass es Pollenaufzeichnungen in Bayern erst seit 1989 gibt.

Zur Berechnung von Beginn und Ende einer Pollensaison gibt es verschiedene Definitionen. Hier wurde die 95 %-Definition angewendet, die empfohlen wird, wenn eine große Anzahl von sehr unterschiedlichen Pollentypen unter ökologischen Gesichtspunkten miteinander verglichen werden soll [41]. Entsprechend dieser Definition ist das Startdatum der Tag im Jahr, an dem 2,5% der Pollen eines bestimmten Pollentyps des Gesamtjahres erfasst wurden, das Enddatum dementsprechend, wenn 97,5 % der Pollen dieses Typs innerhalb des entsprechenden Jahres erfasst wurden.

Das gesamte Pollendatenmanagement (Berechnung von Pollensaisonparametern, Pollentrendberechnungen, Qualitätskontrolle und Erkennung fehlender Daten) wurde mit dem Programm R und dem R-Paket AeRobiology [42] durchgeführt. Die Qualitätskontrolle der Datenreihen verhindert die Einbeziehung von Jahren mit ungenügenden Daten, um Pollensaisonparameter zuverlässig berechnen zu können. Fehlende Daten können aufgrund von zeitweiligen technischen oder anderen Problemen beim Pollenmonitoring auftreten. Es wurden mehrere Qualitätskriterien berücksichtigt, um die Zuverlässigkeit der Daten zu prüfen, z. B. die Möglichkeit, die Pollensaison zu berechnen anhand der vorliegenden Daten zur Zeit des Saisonstarts, des Saisonendes und während der jährlichen Spitzenkonzentrationen. Darüber hinaus wurde als Qualitätskriterium festgelegt, dass der Anteil fehlender Daten innerhalb einer Pollensaison den Wert von 20 % nicht überschreiten darf (*Extern M1-3 Anhang 11.2*).

4.1.1.2 Problemlösung bei Modellparametrisierung und Erstellen von Pollen-Wirkungs-Kurven

Im Verlauf des Projekts hatten wir mit unerwarteten Herausforderungen zu kämpfen, u. a. mit einer zu geringen Rechenleistung, um die entwickelten biologischen Modelle (M6) zu parametrisieren und alle entwickelten Pollenflug-Modelle auf die verfügbaren Klimaprojektionen zu projizieren. Außerdem waren die Daten nicht geeignet, um eine robuste Dosis-Wirkungs-Kurve (Pollen-Wirkungs-Kurve) zu finden.

Das Problem mit der zu geringen Rechenleistung haben wir dadurch gelöst, dass wir einen bereits entwickelten, effizienteren Algorithmus für die Modellanpassung verwendet haben und dass die zu verwendenden Klimaprojektionen unter Verwendung des Medianwertes zusammengesetzt wurden (unsere Modelle wurden nicht mit jedem verfügbaren Klimamodell separat berechnet). Mit den uns zur Verfügung stehenden Symptom-Daten (aus dem Pollen Hayfever Dairy [PHD] der Medizinischen Universität Wien [MUW] in Kooperation mit dem PID, z.B. Karatzas et al. 2014 [43] ließ sich keine robuste Pollen-Wirkungs-Kurve ermitteln, siehe Abb. 14.3.B (der Pollenflug für Birke und Gräserpollen änderte sich während der Studienperiode innerhalb eines Tages stark, die Symptomdaten aber zu wenig, um aus diesen Daten eine Symptom-Wirkungsbeziehung für Pollen für Bayern festlegen zu können). Deshalb entschieden wir uns stattdessen für die Vorhersage der Anzahl von Tagen oberhalb bekannter Schwellenwerte von Pollenkonzentrationen, bei denen Allergiesymptome bei Betroffenen hervorrufen werden (*Extern M4, Anhang 11.2*). Diesen Schwellenwert-Parameter verwendeten wir als Indikator für das Allergierisiko ([40]).

4.1.2 Prädiktive Modellvariablen

Die für die prädiktiven Variablen zur Modellierung des Pollenflugs [44] verwendeten Grundlagen waren:

- Karte der Birkenvorkommen: De Rigo, D., Caudullo, G., Houston Durrant, T., & San-Miguel-Ayanz, J. (2016). The European Atlas of Forest Tree Species: Modelling, data, and information on forest tree species. European Atlas of Forest Tree Species, e01aa69+ [45].

- Human Influence Index (Bevölkerungsdichte, Geschwindigkeit der Stadtausbreitung, Infrastruktur usw.) Sanderson, E.W., Jaiteh, M., Levy, M.A., Redford, K.H., Wannebo, A.V., Woolmer, G., 2002. The human footprint and the last of the wild. *BioScience* 52, 891–904 [46]; Wildlife Conservation Society-WCS, & Center for International Earth Science Information Network-CIESIN-Columbia University. (2005). Last of the Wild Project, Version 2, 2005 (LWP-2): Global Human Footprint Dataset (Geographic) [Data set]. Palisades, NY: NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC) [47].

- Bioklimatische Daten (Temperatur und Niederschlag, mit Werten pro Monat oder Periode, wie z.B. trockenste Periode, feuchteste Periode usw.): Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302–4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086> [48].

- Landnutzung: Chen, M., Vernon, C. R., Graham, N. T., Hejazi, M., Huang, M., Cheng, Y., & Calvin, K. (2020). Global land use for 2015–2100 at 0.05° resolution under diverse socioeconomic

and climate scenarios. *Scientific Data*, 7(1), 320. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00669-x> [49].

- Klassifizierung der Böden: Ribeiro, E. C., Batjes, N. H., & Van Oostrum, A. J. M. (2018). World Soil Information Service (WoSIS)-Towards the standardization and harmonization of world soil data: Procedures Manual 2018 (p. 166). ISRIC-World Soil Information [50].

- Die historischen und aktuellen klimatischen und meteorologischen Daten (250m*250m aufgelöst) wurden vom ECA&D-Projekt bezogen: Cornes, R. C., Schrier, G. van der, Besselaar, E. J. M. van den, & Jones, P. D. (2018). An Ensemble Version of the E-OBS Temperature and Precipitation Data Sets. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(17), 9391–9409. <https://doi.org/10.1029/2017JD028200> [51].

- Die Projektionen des zukünftigen Klimas wurden aus zwei Quellen gespeist. Für weitergehende Modellierungszwecke (z.B. zur Modellierung von Pollenquellen in der Umgebung von Bayern) wurde WGCM (The Working Group on Coupled Modelling, <https://www.wcrp-climate.org/wgcm-overview>) als eine Quelle verwendet. Die für die Modellierung verwendeten Klimamodelle waren: GCMs (ACCESS1-0, BCC-CSM1-1, CCSM4, CNRM-CM5, GFDL-CM3, GFDL-ESM2G, GISS-E2-R, HadGEM2-CC, HadGEM2-ES, INMCM4, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM-CHEM, MIROC-ESM, MIROC5, MPI-ESM-LR, MRI-CGCM3, NorESM1-M. (Working Group on Coupled Modelling. (2011). The WCRP Coupled Model Intercomparison Project—Phase 5 (CMIP5)—CLIVAR Exchanges Special Issue: Vol. No. 56, Vol 16.). Die erste Quelle war notwendig, denn bei Betrachtung des gesamten Verbreitungsgebiets einer Spezies (z. B. Europa) werden damit die Faktoren, welche die Speziesdistribution bestimmen, genauer erfasst und so besser modelliert.

- Die Speziesdistribution wurde mit Daten von ganz Europa modelliert. Um die Pollenfreisetzung aus den für Bayern projizierten Speziesvorkommen zu modellieren (siehe oben), dienten als zweite Quelle die vom LfU durch Anwendung regionaler Klimamodelle erstellten Klimaprojektionen für Bayern. RCMs (KNMI-RACMO22E, UHOH-WRF361H, CLMcom-CCLM4-8-17, SMI-RCA4, CEC-WETTREG2018, Bayerisches Landesamt für Umwelt. Bayerische Klimadaten - Beobachtungsdaten, Klimaprojektionsensemble und Klimakennwerte für Bayern, Augsburg: 12 S. 2020).

4.1.3 Langzeitanalyse der Pollen- Klimazeitreihen

4.1.3.1 Klimatrends

Die Trends der Klimavariablen wurden für den Zeitraum 1989-2018 räumlich über Bayern (mit einer Auflösung von 250 m x 250 m) untersucht (*M 2, Anhang 11.2*), indem die Steigungen der linearen Regressionengeraden für die Rasterdaten-Karte der täglichen Maximal- und Minimaltemperatur und des täglichen Niederschlags verwendet wurden (positive Steigungen bedeuten eine Zunahme der Klimavariablen und negative Steigungen eine Abnahme). Zudem wurden wöchentliche Mittelwerte gebildet. Auf Basis dieser Ergebnisse ließen sich saisonale Mittelwerte der genannten Klimavariablen errechnen. In der Analyse berücksichtigt wurden für den Winter: Dezember, Januar und Februar; für den Frühling: März, April und Mai; für den

Sommer: Juni, Juli und August; für den Herbst: September, Oktober und November. Außerdem wurde die Anzahl der Tage mit mehr als 0,5 mm Niederschlag analysiert. Die gerasterten meteorologischen Beobachtungen (Tageswerte) wurden dem E-OBS-Datensatz aus dem EU-FP6-Projekt UERRA (<http://www.uerra.eu>) entnommen und vom Copernicus Climate Change Service, sowie von den Datenanbietern im ECA&D-Projekt (<https://www.ecad.eu>) zur Verfügung gestellt. Eine Analyse mit Monatsmittelwerten für Gesamtdeutschland wurde ebenfalls erstellt und kann unter https://oteros.shinyapps.io/Climate_Change_Germany eingesehen werden. Ebenfalls in die Analyse des Klimawandels eingeschlossen wurden alle Standorte in Bayern, an denen Pollenfallen arbeiteten oder noch arbeiten.

Dazu untersuchten wir die Trends in den Anomalien von Temperatur und Niederschlag, d.h. die jährliche Abweichung der Temperatur- und Niederschlagswerte in Bezug zum Durchschnitt des Gesamtzeitraums 1989-2018. Wir haben die Veränderungen anhand der Steigungen der linearen Regressionen für die Monatsmittelwerte dargestellt (positive Steigungen bedeuten eine Zunahme der Klimavariablen und negative Steigungen eine Abnahme). In diesem Fall wurde nur jeweils ein Monatsdurchschnitt pro Saison (Februar im Winter, April im Frühling, Juni im Sommer, November im Herbst) berücksichtigt. Die Monatsauswahl erfolgte auf der Basis des Monats für jede Jahreszeit, der in den letzten drei Jahrzehnten die intensivste klimatologische Veränderung erfahren hat. Diese Auswahl wurde während der gesamten Arbeit beibehalten, um die Pollenflugvariablen und die betrachteten Klimavariablen in Beziehung zu setzen.

4.1.3.2 Trends im Pollenflug

Die Berechnung der Auswirkung des Klimawandels auf den Pollenflug wurde nur für die acht Stationen durchgeführt, die eine mindestens 10-jährige Messreihe aufwiesen (Abb. 4.1 und [35]). Eine Beschränkung auf diese acht Stationen hatte den Grund, dass sich bei einer geringeren Anzahl von Jahren die Trendanalyse der Pollenflugvariablen statistisch nicht absichern ließ. In die Berechnung der Pollenflugvariablen im Untersuchungszeitraum 1989-2018 (drei Jahrzehnte) flossen die phänologischen Parameter Beginn, Peak und Ende der Pollensaison als laufender Tag des Jahres (Day of the Year, DOY) ein, sowie der Parameter Pollenmenge, der mithilfe des jährlichen Pollenintegrals als Summe der täglichen Pollenkonzentration ($\text{Pollen} \cdot \text{Tag}/\text{m}^3$) während des Jahres errechnet wird [52]. Nur eine der Messreihen umfassten den gesamten 30-Jahres-Zeitraum (Details zur Länge der Messreihen siehe Abb. 4.1.). Daher haben wir in der Darstellung der Ergebnisse die Dekaden angegeben, die für jede Messstation berücksichtigt wurden. Die Steigungen der Pollenflugtrends wurden analysiert: positive Steigungen bedeuten eine zeitliche Verzögerung des Pollenflugs bzw. eine Zunahme der Pollenmengen, und negative Steigungen eine zeitliche Vorverlagerung des Pollenflugs bzw. eine Abnahme der Pollenmengen.

Schließlich wurden die Beziehungen zwischen Pollenflug- und Klimavariablen berechnet und die Trends zwischen Pollenflugvariablen und Klimavariablen verglichen (*M 1, Anhang 11.2* für Details siehe [35]). Auf diese Weise konnten wir die Klimavariablen ermitteln, die den größten Einfluss auf die beobachteten Trends beim Pollenflug in Bayern aufweisen (*M 8, Anhang 11.2*).

4.1.3.3 Modellierung

Wir modellierten die Vorkommen der Pollenquellen (*M 3, Anhang 11.2*), wie viel Pollen pro bestehende Population Fläche bzw. Pollenquelle emittiert werden kann, und wann die Birken- bzw. Gräserpollensaison beginnt, auf dem Höhepunkt ist, oder endet (d.h. Quelle, wie viel pro Quelle, wann) (*M 5, Anhang 11.2*).

Wir haben mathematische Modelle zur Pollenphänologie entwickelt, indem wir historische Pollendaten (ZAUM und PID)- und Wetterdaten aus der E-OBS Datenbank des ECA&D-Projektes (www.ecad.eu) verwendeten [51]. Bei diesem Schritt haben wir alle Parameter modelliert (Startdatum, jährlicher Pollenindex usw., siehe 4.1.1.1.), die mit der Charakterisierung einer Pollensaison zusammenhängen. Es wurden insgesamt 21 phänologische Modelle getestet (eines davon von uns entwickelt in [44]) (*M 7, Anhang 11.2*). Getestet wurden die meisten Modelle mittels der kombinierten Anwendung der beiden R-Pakete AeRobiology und phenor [42, 53].

Tabelle 4.1. In TP 1 entwickelte Modelle.

Modelle	Pollentyp	Ziel
Vorkommen der Quellen	Birke/Gräser*	Das Erfassen des Vorkommens der Pollenquellen ist den ersten Schritt um Pollenmengen vorhersagen zu können. *Das Model zur Modellierung der heutigen Verteilung würde dann auch für die zukünftige Speziesverbreitung benutzt
Pollenmengen	Birke/Gräser	Die jährlichen Pollensummen (Pollenindex, jährliches Pollenintegral) wurde aus dem Vorkommen der Quellen und klimatische Parameter modelliert.
Phänologische Modelle	Birke/Gräser	Modelle für Start-, Peak-, Enddatum und Saisonslänge wurde entwickelt.
“Concentric Ring models”	Birke/Gräser	Der Zusammenhang zwischen Vorkommen der Quellen, Freisetzung von Pollen pro Quelle, und Menge von Pollen an jedem Ort auf der Karte von Bayern würde modelliert.
Allergie-Risikotage	Birke/Gräser	Allergie-Risikotagen spiegeln die Belastung von Allergiker her. Basierend auf den gebildeten Pollenkurven können Tage mit >100 (Birke) oder >50 Pollen/m ³ (Gräser) bestimmt werden.

Außerdem wurden Modelle zur Artenverteilung (Pollenquelldaten, siehe 4.1.2) und zur Darstellung des jährlichen Pollenintegrals für Birken- und Gräserpollen bis 2085 entwickelt (M 6, Anhang 11.2), um zukünftige Pollenkonzentrationen unter verschiedenen Klimawandelszenarien vorherzusagen (M 8 Anhang 11.2). Als geeignetster Ansatz, um die räumliche Verteilung der Pollenquellen und das Pollenintegral in Beziehung zu setzen, erwies sich die Methode der konzentrischen Ringe „Concentric Ring Method (CRM)“. Mit dieser Methode wird der Zusammenhang zwischen dem Vorkommen einer Pollenquelle (z. B. ein Birkenbaum) und deren Einfluss auf die Konzentration der Pollen am Messpunkt dargestellt. Damit können das Vorkommen der Pollenquellen und die an einem Punkt gemessene Pollenmenge ermittelt werden [54-56].

4.1.3.4 Visualisierung der Resultate

Alle Resultate wurden durch eine interaktive, webbasierte Applikation visualisiert (Extern M5-6, Anhang 11.2), die von der Gruppe von Prof. Dr. Timpf an der Universität Augsburg auf Basis der OpenSource Software GeoServer (Kartendatenbank) sowie Apache Tomcat (Webserver) mit Leaflet (Kartenanwendung) programmiert wurde (M9, einschließlich München, Bamberg, Münnerstadt und Oberjoch, Anhang 11.2). Die Anwendung ist online zugänglich unter <https://geoserver.geo.uni-augsburg.de/klimapollen/> oder www.klimapollen.de. Die für die Darstellung benötigten Karten wurden erstellt und in die Applikation integriert (M8-9).

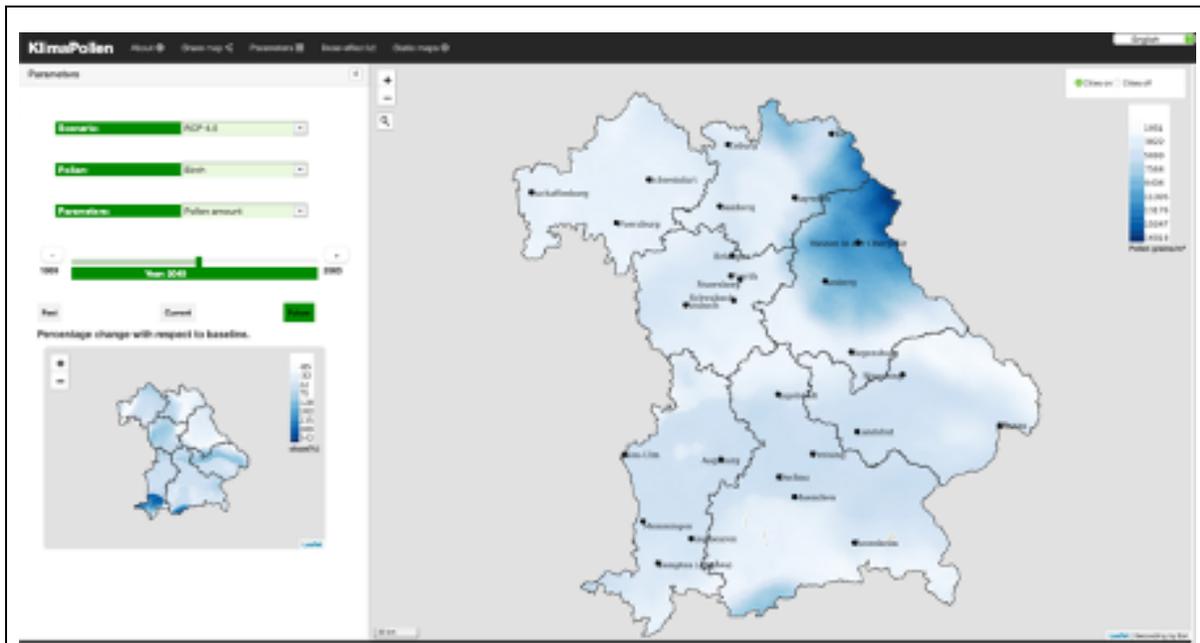


Abb. 4.2: Screenshot aus der WebApp, in der die Ergebnisse von TP1 visualisiert werden. Auf Deutsch (in Arbeit) und Englisch. Abrufbar auf <https://geoserver.geo.uni-augsburg.de/klimapollen/>, und optimiert für die Internetbrowser Firefox und Opera (Meilenstein extern M6).

Abbildung 4.2 zeigt einen Screenshot der interaktiven Webanwendung (Meilenstein extern M5) mit Hauptkarte, Auswahl der Klima- und Pollenparameter (links oben) und Indexkarte (links unten). Die Hauptkarte zeigt für die Pollentypen Birke bzw. Gräser je nach Annahme für das Klimawandelszenario (RCP 2.6, 4.5 bzw. 8.5) die Pollenflugvariablen *Pollenmenge*, *Datum des*

Beginns der Pollensaison, Datum des Höhepunkts der Pollensaison, Länge der Pollensaison und Allergierisikoparameter [= Anzahl der Tage während der Pollensaison mit täglichen Pollenkonzentrationen über 50 Pollenkörner pro m³ Luft (bei Gräsern) und über 100 Pollenkörner pro m³ Luft (bei Birke)], angegeben als gleitender Mittelwert über 30 Jahre]. Die Karte kann jahresgenau zwischen 1989 und 2085 ausgewählt und damit der vergangene, aktuelle und zukünftige Zustand angezeigt werden (zur Berechnung der Kartendaten siehe 4.1.3.1 - 4.1.3.3.). Jeder Parameter erhält ein eigenes Farbschema, das sich auch in der Indexkarte widerspiegelt. Die Indexkarte zeigt die Veränderung gegenüber der aktuellen Karte an mit dem 30-jährigen gleitenden Mittelwert von heute als Referenzwert. Weitere Informationen können über zusätzliche Reiter (Dosis-Wirkungs-Kurve, d. h. PollenEffekt-Kurve, Karte teilen, statische Karten) aufgerufen werden. Beim Klick auf „Dosiseffekt“ wird eine publizierte Pollen-Wirkungs-Beziehung gezeigt.

4.2 Ergebnisse und Diskussion

4.2.1 Langzeit-Analyse von Klimaparametern für Bayern

Die Klimakarten von Bayern für die Jahre seit 1989 (in diesem Jahr begannen die Messungen des Pollenflugs in Bayern) (M1-extern, *Anhang 11.2*) wurden erstellt. Die Jahrestemperaturen in Bayern haben in den letzten drei Jahrzehnten zugenommen. Dies stimmt mit früheren Studien aus Deutschland überein [57]. Allerdings sind Intensität und Richtung der Veränderungen im Jahresverlauf nicht immer gleich (Abb. 4.3). Die erstellten Klimakarten von Bayern (M2) sind während des Projektes vom LfU publiziert worden, ausführlicher als in diesem Bericht möglich. (Sie sind z. B. zu finden unter https://www.bestellen.bayern.de/shoplink/lfu_klima_00168.htm.) Die für den Pollenflug relevanten Klimawandelkarten (M2) werden dann auf www.klimawandel.de verwendet (RCP2.6, 4.5 und 8.5 für Bayern).

Die bayernweit größten Veränderungen zeigten sich bei den Höchsttemperaturen in den Sommer- und Herbstmonaten. Die Wintertemperaturen gingen hingegen leicht zurück, obwohl die Steigungen nicht signifikant waren. Die Niederschläge im Winter und Frühjahr nahmen in den Alpen im Süden deutlich zu, im übrigen Gebiet waren die Niederschlagstrends jedoch nicht signifikant (Abb. 4.3). Diese überraschenden Befunde wurden auf Wetterdaten aus dem E-OBS-Dataset vom EU-FP6 Projekt UERRA (<https://www.uerra.eu>), vom Copernicus Climate Change Service und vom ECA&D-Projekt (<https://www.ecad.eu>) berechnet. Dabei betrachteten wir lediglich den Zeitraum, für den Pollenflugdaten in Bayern vorhanden sind, also ab 1989. Das Ergebnis dieser Berechnungen ist in Abb. 4.3 dargestellt. Längere oder andere Betrachtungszeiträume können zu anderen Ergebnissen führen.

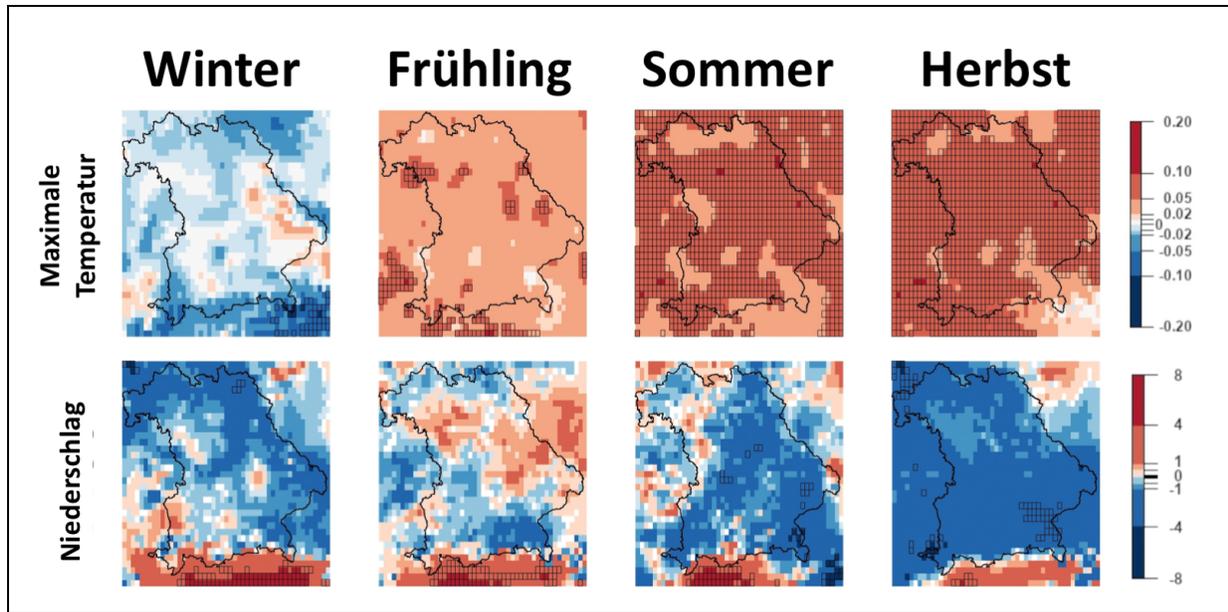


Abb. 4.3: Klimawandel in Bayern bis heute nach Jahreszeiten und Ort in Bayern (1989-2018). Rot bedeutet eine Zunahme, Blau eine Abnahme der linearen Regression der 3-Monats-Mittelwerte der Variablen. Schwarz umrandet sind signifikante Änderungen ($p < 0.05$). Das Klima in Bayern wird kontinentaler. Temperaturänderung in Grad Celsius/Jahr und Niederschlag in $\text{mm}^3/\text{m}^2/\text{Jahr}$. Die Temperatur nimmt über (fast) ganz Bayern im Sommer und Herbst signifikant zu, der Niederschlag nimmt signifikant nur am Alpenrand zu. Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis von Wetterdaten für die Jahre 1989 bis 2018 vom EU-FP6-Projekt UERRA (<https://www.uerra.eu>), vom Copernicus Climate Change Service und vom ECA&D-Projekt (<https://www.ecad.eu>). Für mehr Details siehe [44].

4.2.2 Langzeit-Analyse von Pollenflug-Zeitreihen

Trends in Bezug auf Zeitpunkt und Intensität des Birken- und Gräserpollenflugs wurden für München dargestellt, der Pollenmessstation mit der längsten Zeitreihe (Abb. 4.4 A).

Die Menge der Birkenpollen nahm an dieser Messstation im Gesamtzeitraum zu, wobei diese Zunahme statistisch nicht signifikant war. Signifikant war jedoch die Zunahme der Anzahl Tage, an denen ein hohes Allergierisiko besteht (Tageswerte > 100 Pollen/ m^3). Bei den Gräserpollen nahmen sowohl das saisonale Pollenintegral (saisonale Pollenmenge) wie auch die Anzahl der Tage mit hohem Allergierisiko (Tageswerte > 50 Pollen/ m^3) signifikant ab. Es verlängerte sich jedoch die Blütezeit infolge des früheren Beginns der Pollensaison, was den Zeitraum eines potenziell vorhandenen Allergierisiko für Allergiker ausweitet [58].

Unter Berücksichtigung aller Pollenstationen und weiterer Pollenarten zeigen unsere Ergebnisse, dass die Pollensaison generell tendenziell früher beginnt als in der Vergangenheit. Erle (*Alnus*), Gräser (*Poaceae*) und Zypressengewächse/Eibengewächse (*Cupressaceae/Taxaceae*) zeigen dabei die auffälligsten Vorverlagerungen des Beginns der Pollensaison. (Abb. 4.4 B). Trends hinsichtlich der Pollenmenge sind häufig widersprüchlich und sehr pollenartenabhängig. Für einige Arten von Baumpollen wie Erle (*Alnus*), Birke (*Betula*), Zypressengewächse/Eibengewächse (*Cupressaceae/Taxaceae*) und Esche (*Fraxinus*) wurde eine deutliche Zunahme der Pollenemissionen dokumentiert. Ein allgemeiner Anstieg der

Pollenemissionen von Bäumen im Zusammenhang mit dem Klimawandel wurde bereits in anderen Teilen Europas festgestellt [17]. Bei einigen krautigen Arten ließ sich dagegen ein Rückgang der Pollenkonzentrationen dokumentieren [59]. Der Meilenstein M3-extern (Lineare Extrapolation der historischen Parameter) wurde gestrichen, weil im Laufe des Projektes klar wurde, dass diese ursprünglich geplante Vorgehensweise wissenschaftlich keinen Sinn macht: Klimawandelparameter entwickeln sich nicht linear und bestimmen die Pollenflugvorhersagen nicht.

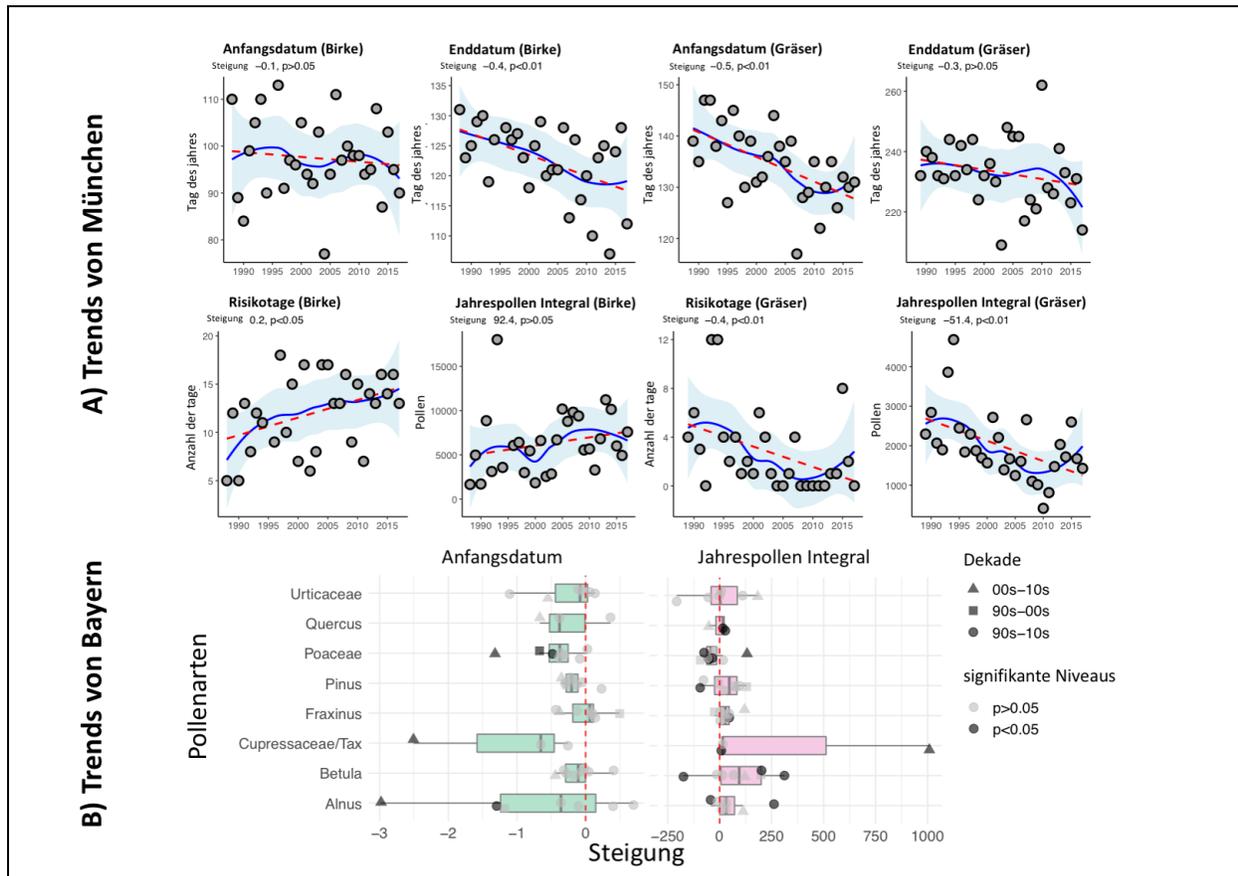


Abb. 4.4: Die bereits sichtbaren Effekte des Klimawandels auf den Pollenflug in Bayern (1989-2018). A) Lineare Verläufe (rote gestrichelte Linien) der wichtigsten Pollenflugparameter für die Station mit der längsten Zeitreihe (München); B) Zusammenfassung der Verläufe für Anfang und Intensität der Pollenflugsaison für die häufigsten Pollenarten in Bayern (max. 8 Stationen). Dunkle Punkte für $p < 0.05$. Daten von ZAUM, ePIN und PID kombiniert (alle verfügbaren Daten von Bayern). Teil von Meilenstein Extern M1. Für Meilenstein Extern M2 wird auf die Website www.klimapollen.de verwiesen (Vorhersage des Pollenflugs an allen Orten in Bayern, mit darin München, Bamberg, Mürrenstadt, Oberjoch).

4.2.3 Verhältnis zwischen Veränderungen im Pollenflug und Klimaparametern

Wir beobachteten in unseren Analysen eine deutliche Vorverlagerung der Pollensaison, die mit der Erwärmung im Spätwinter und im Frühjahr einherging (z. B. Birke - Beginn der Pollensaison). Später blühende Pflanzen wie die Gräser wurden ebenfalls von den Temperaturen im Frühjahr beeinflusst. Darüber hinaus wurde die Intensität der Gräserpollensaison durch die Niederschläge im Frühjahr und die Intensität der Birkenpollensaison durch die Temperatur im vorangegangenen Sommer bestimmt (Abb. 4.5).

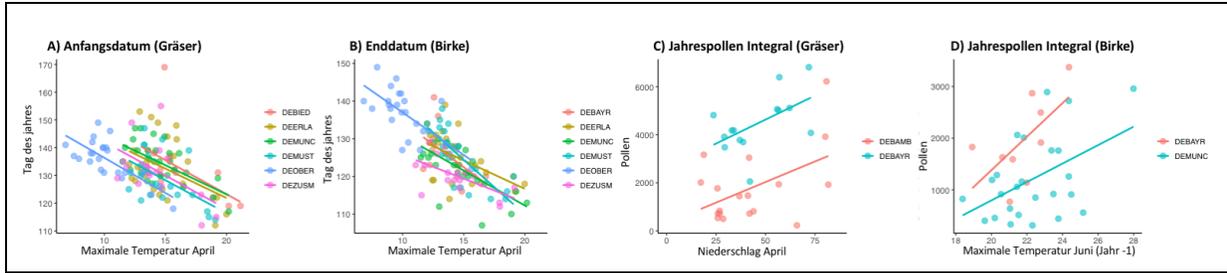
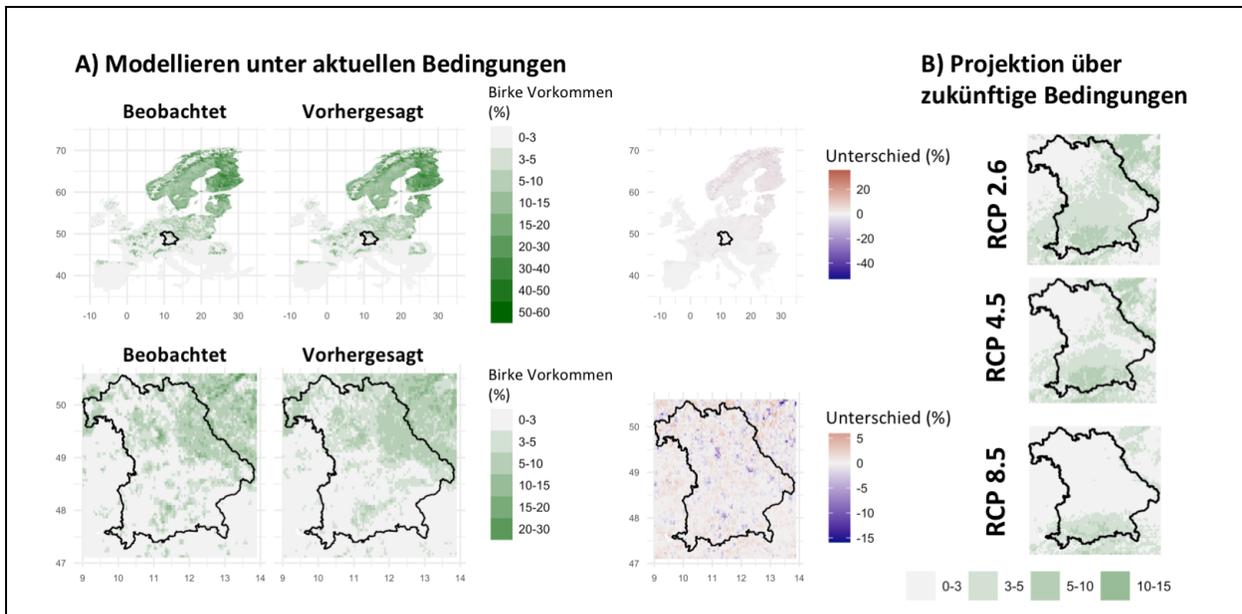


Abb. 4.5: Klimatische Basisfaktoren, welche den Birken- und Gräserpollenflug in Bayern beeinflussen. Unabhängig vom Ort ist der Einfluss bestimmter Faktoren vorhersagbar (ermittelt aus den historischen Zeitreihen). A) B): Beginn und Ende der Pollenflugsaison abhängig von der Temperatur im April des jeweiligen Jahres. C) D): Die jährliche Gesamtpollenmenge abhängig von Niederschlag bzw. Temperatur im Vorjahr. Von allen erprobten Faktoren und Zeitfenster werden nur die signifikanten Parameter gezeigt (siehe [35]).

4.2.4 Modellierung von Speziesverteilung für Birke und Gräser

Die Speziesdistributionskarten wurden erstellt (*M3, Anhang 11.2*). Das Modell für die Häufigkeit von Birkenvorkommen wurde an 100.000 Punkten in ganz Europa trainiert und erzielte bei externer Validierung (Kreuzvalidierung) ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,84$. Abbildung 4.6 zeigt die Ergebnisse des Modells für Europa bzw. für das Bundesland Bayern. Die zukünftigen Projektionen für die Birkenvorkommen in Europa zeigten eine Abnahme der Birkenzahl in niedrigeren Höhenlagen, während eine Zunahme der Birkenzahl in den Alpen und entlang der nördlichen Grenzen des europäischen Verbreitungsgebietes in Übereinstimmung mit Dyderski et al. (2018) prognostiziert wurde [60]. In allen zugrundeliegenden Klimawandelszenarien wird für Bayern die gleiche Richtung der Veränderung vorhergesagt, wobei die Birke in den Niederungen im Nordwesten der Region und im Donautal deutliche zurückgeht. Szenarien unter RCP 4.5 und RCP 8.5 prognostizieren einen drastischen Rückgang im Nordosten, wo Birken einen höheren relativen Anteil an der Waldbedeckung haben, und eine Verlagerung in höher gelegene Gebiete wie die Hänge der Alpen im Süden. (Abb. 4.6 B).



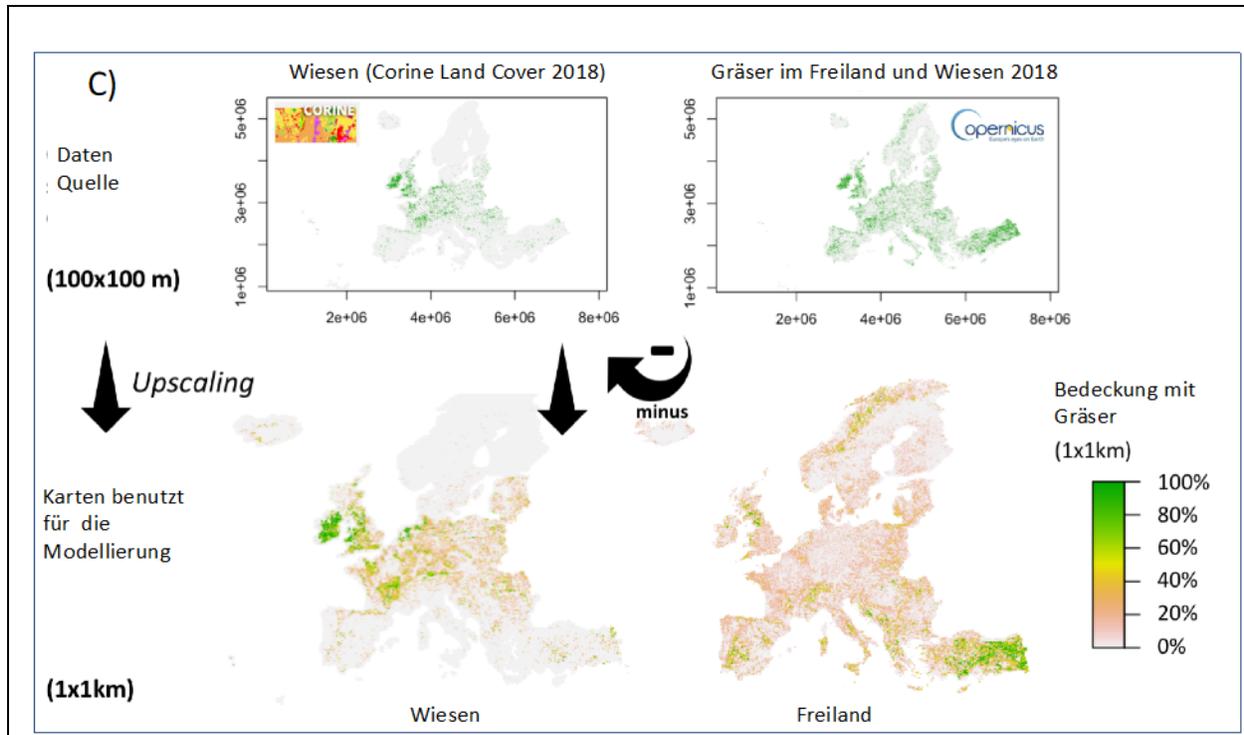


Abb. 4.6: (A) heutige tatsächliche und modellierte Birkenbaum-Verteilung über Europa und Bayern, und Unterschied (in %) zwischen tatsächlichem und modelliertem Vorkommen; (B) modellierte Birken-Verteilung je nach Klimawandelszenario für 2070; (C) Speziesdistribution für Gräser. Für mehr Details siehe Rojo et al., Regional Climate Change 2021 Vol. 21, 9, <https://doi.org/10.1007/s10113-020-01729-z> [35].

Die Ausbreitung der Birke wird durch hohe Temperaturen und geringe Wasserverfügbarkeit in der heißesten Zeit des Jahres begrenzt. Die Ausbreitung des Waldes im Allgemeinen wird aber auch durch die menschliche Landnutzung begrenzt. Menschliche Aktivitäten haben die Landschaft seit Urzeiten tiefgreifend verändert. Flächen, die für landwirtschaftliche Felder, Viehweiden und städtische Infrastruktur ausgewiesen wurden, haben die Größe und Zahl der Waldflächen in Mitteleuropa verändert [61]. Daher waren die Prädiktoren, die die größte Varianz in der räumlichen Modellierung der Birkenvorkommen erklärten, die Waldbedeckung, Indikatoren, die den menschlichen Nutzungsdruck beschreiben und die bioklimatischen Variablen Jahresmitteltemperatur sowie Saisonalität und Menge des Niederschlags während der wärmsten Monate. Diese Variablen wurden berücksichtigt.

4.2.5 Modellierung der Pollenflugintensität

Zur Modellierung der Pollenflugintensität wurde die Beziehung zwischen der Menge der Pollenquellen und dem jährlichen Pollenintegral berechnet. Abbildung 4.7 zeigt eine Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse bezüglich des theoretischen Einflusses vorhandener Birken (als Pollenquelle) auf die Zahl erfasster Birkenpollen. Dabei zeigen die dargestellten Korrelationskoeffizienten zwischen der Anzahl der Birken in 1 km breiten Ringen um die Pollenmessstation und dem Pollenintegral in Bezug auf die Entfernung des Rings zur Pollenmessstation, dass Bäume in Entfernungen von bis zu 80 km einen gewissen Einfluss auf das jährliche Pollenintegral haben. Der abnehmende Trend der Kurve nach etwa 40 km deutet im Zusammenhang mit dem exponentiellen Anstieg der Ringfläche auf einen verbleibenden Einfluss

von Bäumen hin, die weiter als 40 km entfernt sind. Bei den Gräsern korrelierte die Abundanz von Wildgräsern (Grünland ohne Ackerflächen und Weideland) gut mit der Pollenmenge der Gräser (Abb. 4.7). Daher berechneten wir nach der CRM auch den spezifischen Einflussindex (Specific Influence Index, SII) der Pollenquellen, der in beiden Fällen, bei Birke und bei Gräsern, als Kovariable für die Modellierung der Pollenflugintensität verwendet wurde [55]. Zusammengefasst zeigt der Species influence index, dass das Vorkommen einer Spezies am Messort und dessen Umgebung einer der wichtigsten Faktoren dafür ist, wie viele Pollen an einem Ort fliegen.

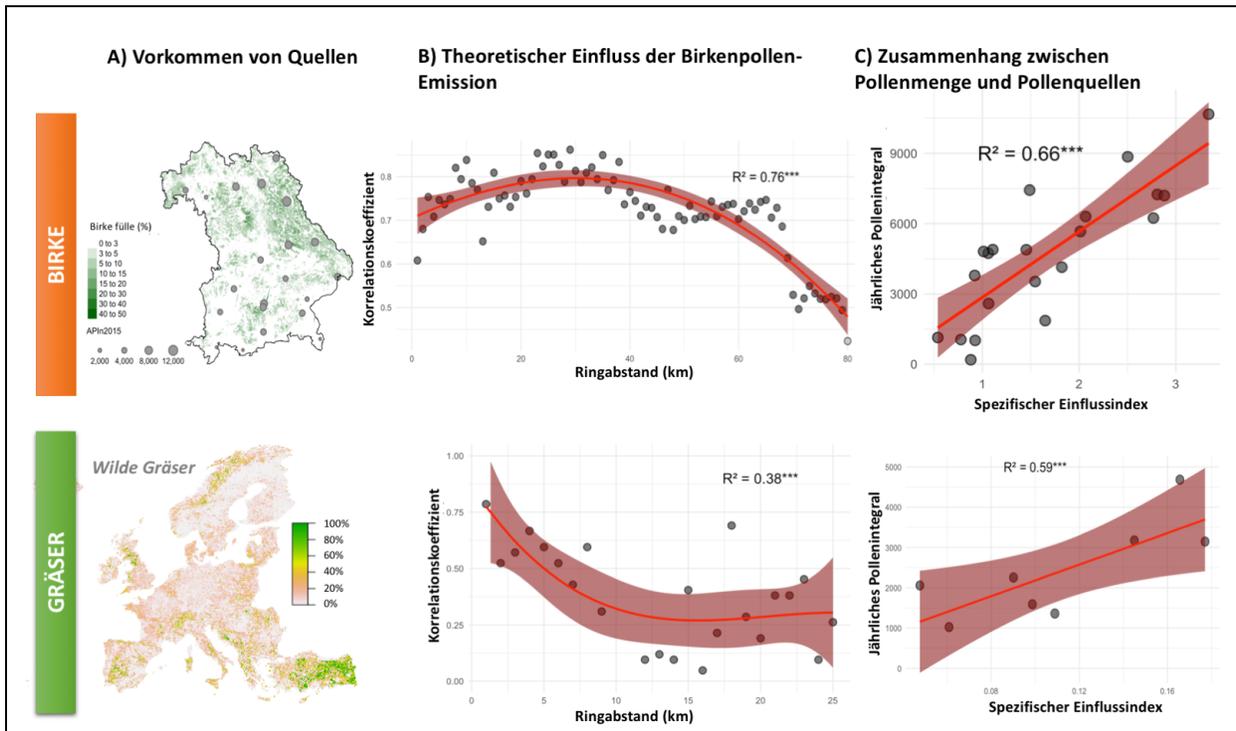


Abb. 4.7: Anwendung der konzentrischen Ringmethode (CRM) für den Zusammenhang zwischen Pollenquellen (Pflanzen) und Pollenflug für Birken- und Gräserpollen. (A) Vorkommen (grün) und Pollenintegral für Birke (graue Kreise). (B) Zusammenhang zwischen den Pollenquellen in 1-km-Radien um eine Pollenmonitoringstation (x-Achse) und dem Pollenintegral (y-Achse); (C) Zusammenhang zwischen jährlichem Pollenintegral und spezifischem Einflussindex aus CRM.

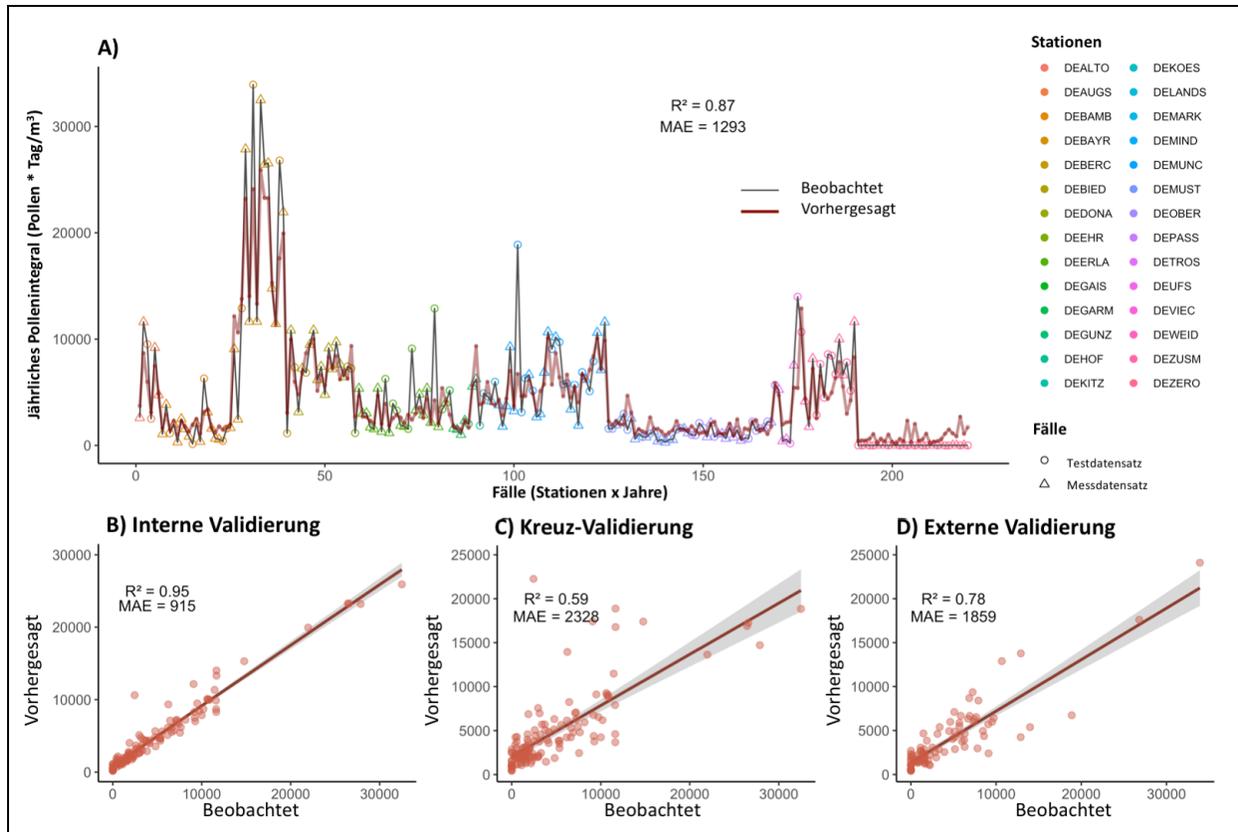


Abb. 4.8: Validierung (M7, Anhang 11.2) der modellierten (rote Linie) mit bereits gemessenen (schwarze Linie) jährlichen Pollenintegralen für Birkenpollen Abkürzungen der Stationscodes siehe Abb. 4.1 und Anhang 11.1.

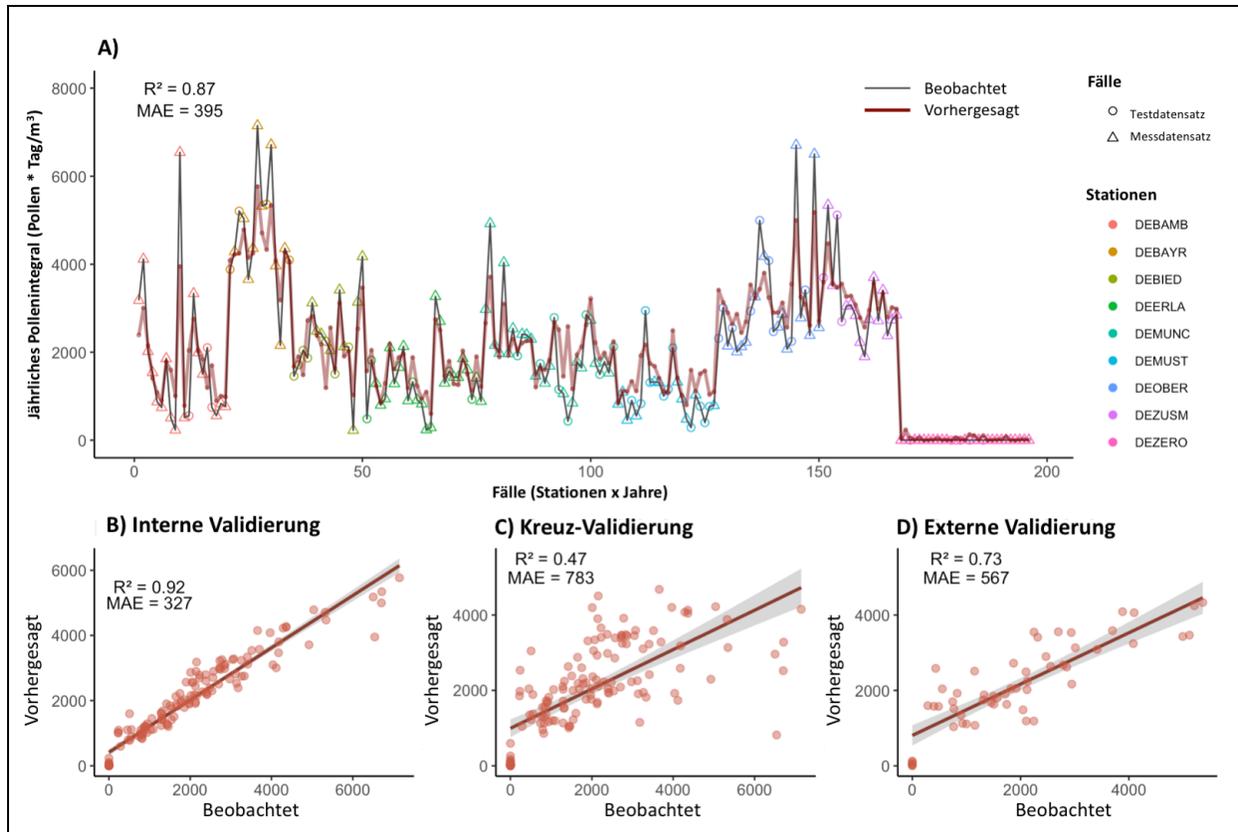


Abb. 4.9: Validierung (M7, Anhang 11.2) der modellierten (rote Linie) mit bereits gemessenen (schwarze Linie) jährlichen Pollenintegrale für Gräserpollen.

Die Abbildungen 4.8 und 4.9 zeigen die Resultate der Validierung (M7, Anhang 11.2) für die Vorhersage der jährlichen Pollenintegrale unter Anwendung der Wetterparameter und SII (Specific Influence Index, erklärt in Abb. 4.7) für Birke und Gräser. Kreuzvalidierung ist eine Art der Validierung, bei der iterativ Teile des Datensets weggelassen werden, und deutet auf die Robustheit der Methode hin (ein Maß für gleiche Ergebnisse bei unterschiedlichen Datensets). Eine interne Validierung zeigt, wie gut das Modell die Daten, mit denen es trainiert wurde (hier 80% der Daten) erklärt. Die externe Validierung zeigt, wie gut das Modell die Daten, die nicht zum Training verwendet wurden (20% der Daten) erklärt. Die Validierung zeigt, dass die angewandte Methode der Modellierung gut funktioniert.

4.2.6 Modellierung der phänologischen Parameter und des Allergierisikos

Die phänologischen Modelle (M5, Anhang 11.2) wurden mit dem Ziel entwickelt, die Eigenschaften der Pollensaison unter zukünftigen Klimawandelszenarien vorherzusagen. Abbildung 4.10 zeigt die Fehler der verschiedenen phänologischen Modelle für Start, Höhepunkt und Enddatum der Pollensaison von Gräsern und Birke (18 verschiedene Modelle werden gezeigt, für weitere Details zu den getesteten Modellen siehe [44, 53]).

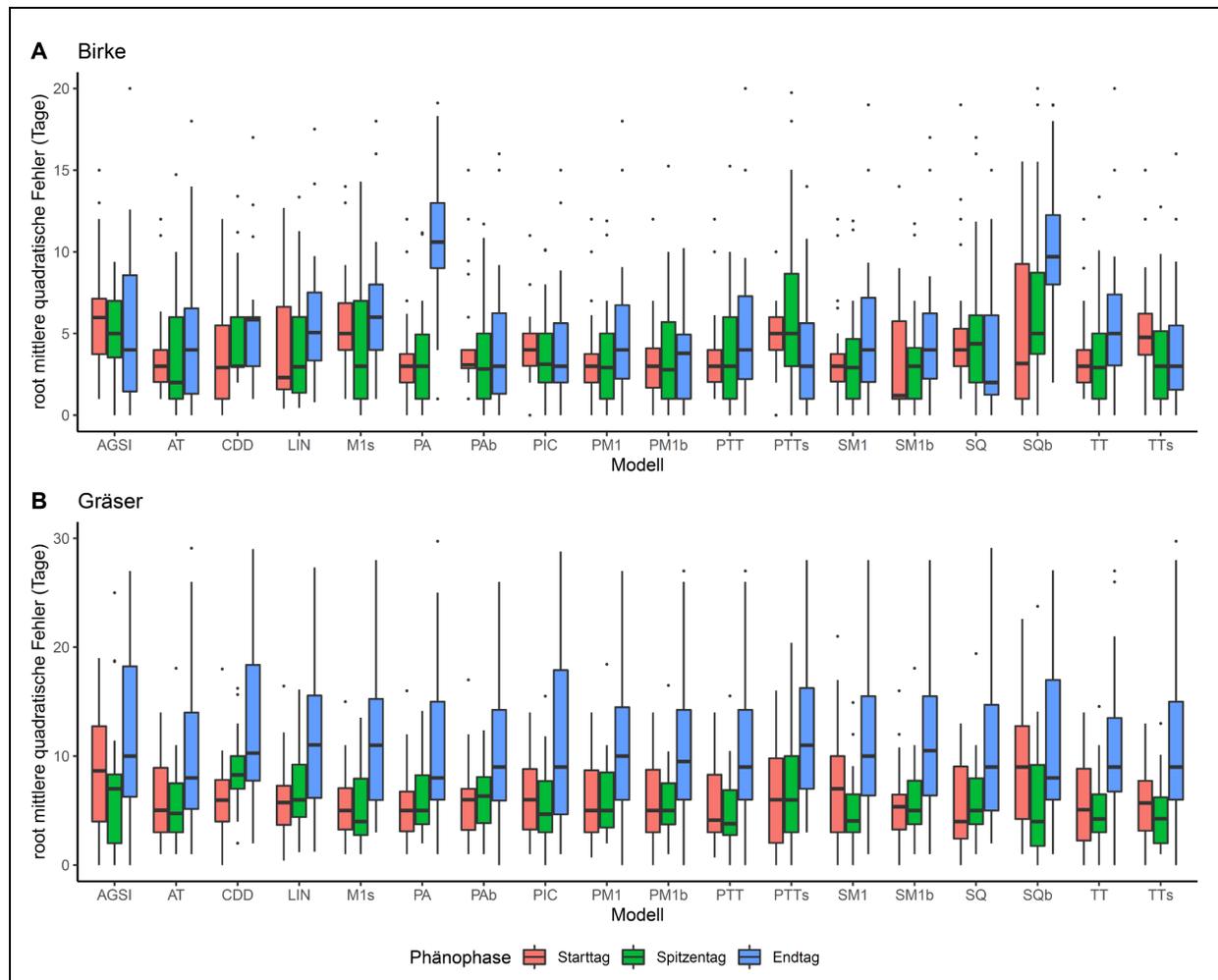


Abb. 4.10: Externe Validierung (als RMSE, root mean square error) der phänologischen Modelle für A) Birken- (*Betula*) und B) Gräserpollenflug (*Poaceae*). Alle uns bekannte Methoden, um Anfang-, Höhepunkt, und Ende einer Pollenflugsaison vorherzusagen, werden gezeigt. PIC wurde am ZAUM entwickelt. Die 5 besten Modelle wurden dann als Ensemble (PM1b, PIC, TTs, PTT und AT) für die Modellierungen genutzt. Die Parameter für den Pollenflug von Gräsern sind schwieriger zu prognostizieren als für Birke.

Es lässt sich erkennen, dass der Beginn der Pollensaison eine bessere Performance zeigt als der Höhepunkt und das Ende. Die Modelle zeigen einen geringeren Fehler für Birkenpollen als für Gräserpollen. Die Modelle mit den geringsten Fehlern (PM1b, PIC, TTs, PTT und AT) wurden dann als Ensemble benutzt, um die phänologischen Parameter vorherzusagen (siehe Abb. 4.11).

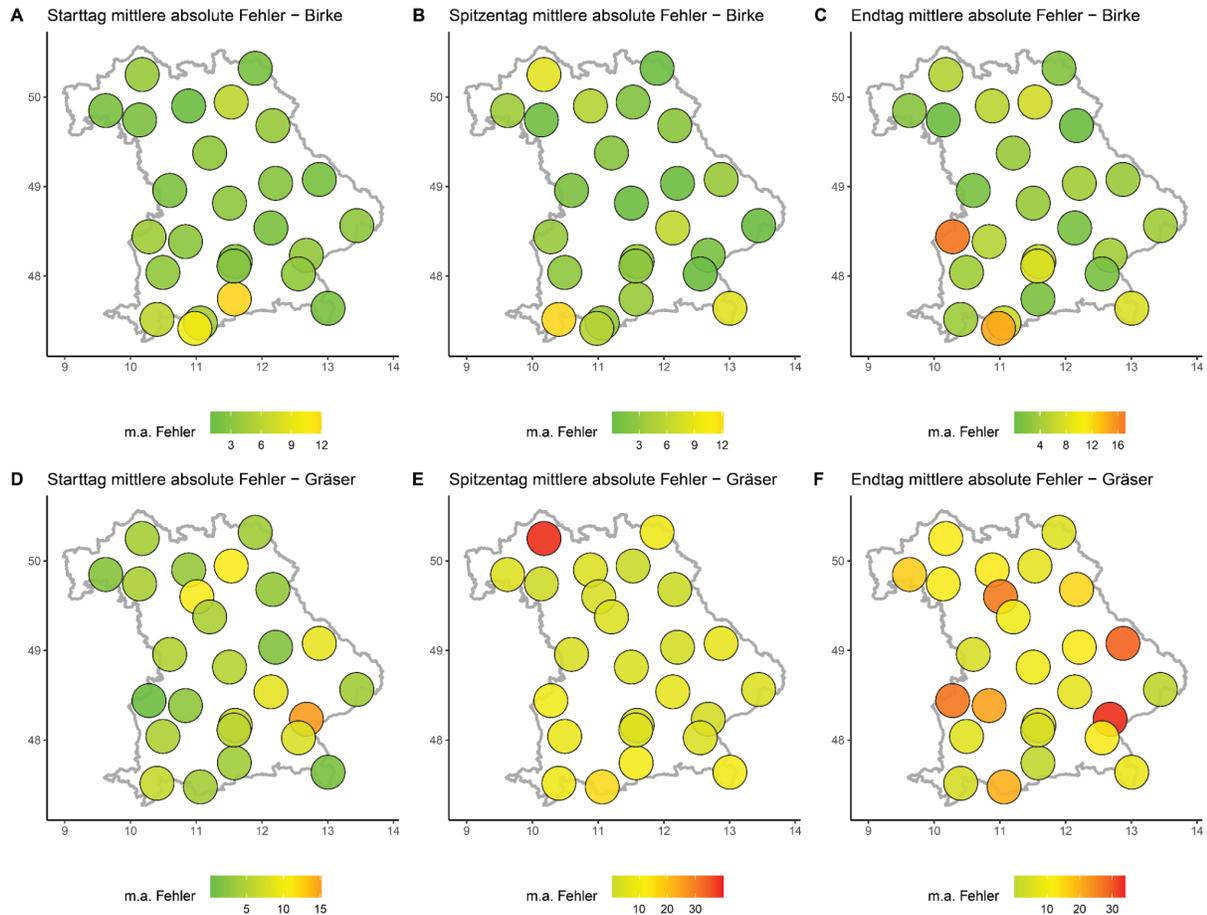


Abb. 4.11: Mittelwert der absoluten Fehler (Mean Absolute Error, MAE) des Ensembles mit den 5 Modellen (PM1b, PIC, TTs, PTT und AT) (siehe Abb. 4.10) für Anfang, Höhepunkt und Ende der Pollensaison für Birken- und Gräserpollen. Grün bedeutet wenig Unterschied zwischen den Vorhersagen der Modelle, rot bedeutet einen größeren Unterschied. (Unterschied gemessen in Tagen). Die Fehler für Birkenpollen sind geringer als für Gräserpollen.

Abbildung 4.11 zeigt die Fehler der angewandten Modelle ((PM1b, PIC, TTs, PTT und AT) für die verschiedenen phänologischen Parameter. Es zeigt sich, dass der Beginn des Pollenfluges am besten zu modellieren ist.

Abbildung 4.12 zeigt den absoluten Fehler der verschiedenen Ensemble-Berechnungen des phänologischen Modells eines beliebigen kumulierten 5 %-Zeitraums der Pollensaison. Wir haben festgestellt, dass die Modelle entlang der Saison robust sind und in der Lage, jedes kumulierte Prozent der Pollensaison vorherzusagen. Nach Kumulation von 50 % der Pollensaison nimmt der Fehler der Vorhersage jedoch zu, wie in den Abbildungen 4.8 bis 4.11 dargestellt. Diese Berechnungsmethode ist notwendig für die Rekonstruktion der täglichen Pollenkurve unter den zukünftigen Bedingungen des Klimawandels.

Die Rekonstruktion der Pollenkurven (Intensitätsparameter, *M6*, Anhang 11.2) basiert auf den phänologischen Modellierungen und den Vorhersagen des jährlichen Pollenintegrals. Tage wurden berechnet, wenn 5 % des jährlichen Pollenintegrals geflogen sind, dann 10 % usw. Damit kann die Pollenflugkurve erstellt werden (siehe Abb. 4.13 A). Diese Kurve würde dann weiter

benutzt, um die Allergie-Symptom-Risikotage zu berechnen (M 10, Anhang 11.2). Wir wollten eine quantitative Verbindung zwischen Änderungen im Pollenflug und einer veränderten gesundheitlichen Belastung herstellen. Es stellte sich heraus, dass diese Verbindung nicht einfach zu bekommen war n [62]. Für Bayern haben wir versucht, mit den Daten aus dem Pollen Hayfever Diary (PHD; z.B. [43]) der Medizinischen Universität Wien (MUW) in Kooperation mit dem PID, eine Pollen-Wirkungs-Beziehung aufzustellen, siehe Abb. 4.13 B). Diese Methode (M10, Anhang 11.2) hat keine klare Beziehung zwischen Pollenkonzentrationen und Allergiesymptomatik in München (wo die Mehrheit der PHD-Nutzer Daten eingegeben hatten) geliefert, weil die Korrelation zwischen Allergiesymptomatik und Pollenflug der Birke oder Grass (außer für Lunge bei Gräser) zwar hochsignifikant ($p < 0.001$) war, aber die Kurven verliefen zu flach und erklärten wenig von der Symptomatik (R^2 alle < 0.50) [43]. Dies könnte mit der Problematik des PHD-Tagebuches zusammenhängen, dass zu wenige Personen ihre Daten durchgehend eingeben, d. h. die so dokumentierte Symptomatik ist die einer sich ständig ändernden Population (persönliche Mitteilung Prof. Bergmann). Deswegen berechneten wir alternativ anhand der Pollenkurve, wie viele Tage oberhalb eines bestimmten Schwellenwertes auftraten. Diese Schwellenwerte wurden der Literatur entnommen [40]. Für die Mehrheit der Birkenpollenallergiker sind ab Konzentrationen von 100 Pollen/m³ Luft Allergiesymptomen zu erwarten. Bei Gräserpollen ist dieser Wert bei 50 Pollen/m³ Luft anzunehmen. Anhand dieser Vorgehensweise können die zukünftigen Allergiesymptomatiken berechnet werden: Wie viele Tage mehr oder weniger mit >100 Birkenpollen/m³ und wie viele Tage mehr oder weniger mit >50 Gräserpollen/m³ wird es wann und wo geben. Nach Rücksprache mit LGL (Frau Dr. Zink) würde auf die Modellierung für Esche wegen Zeitgründen verzichtet (M10-Esche).

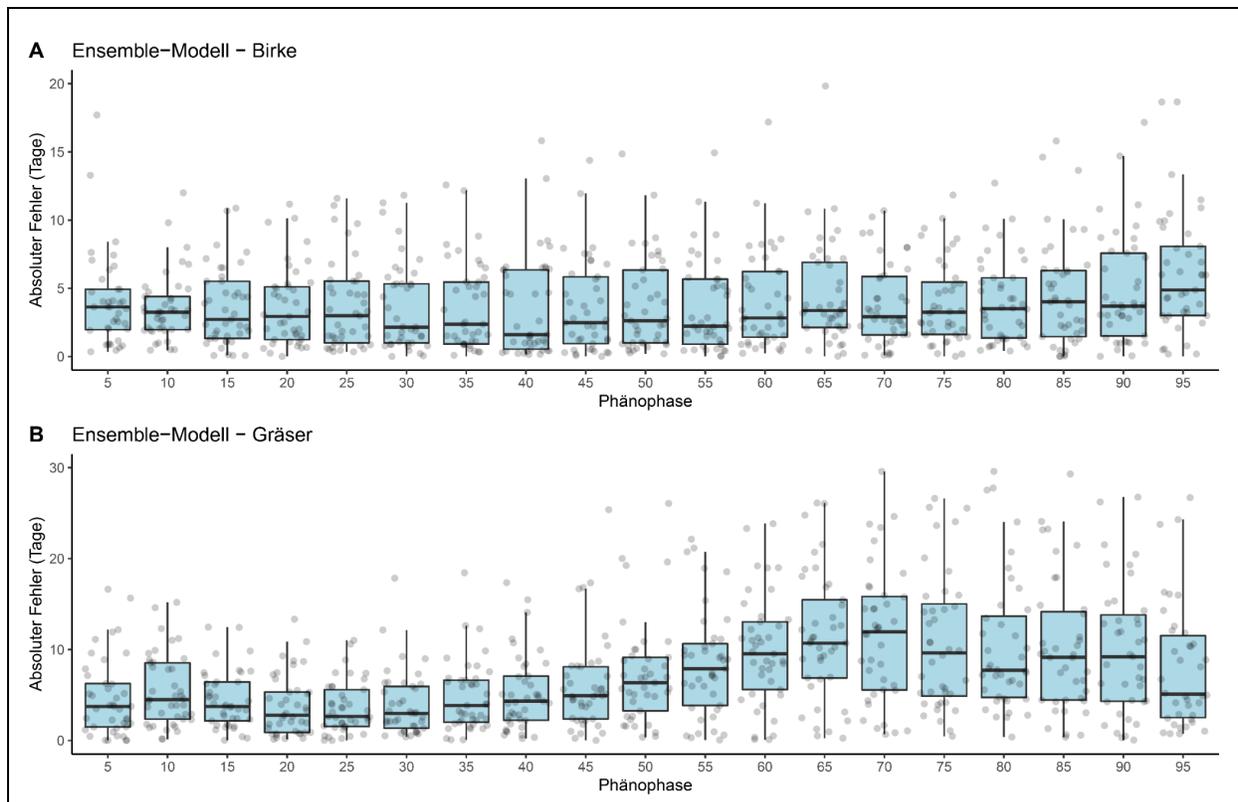


Abb. 4.12: Absolute Fehler des Ensembles der phänologischen Modelle für die Vorhersage aller 5 %-Quantile für Birke und Gräserpollen. Die Ungenauigkeit nimmt, insbesondere für Gräserpollen, am Ende der Pollenflugsaison zu.

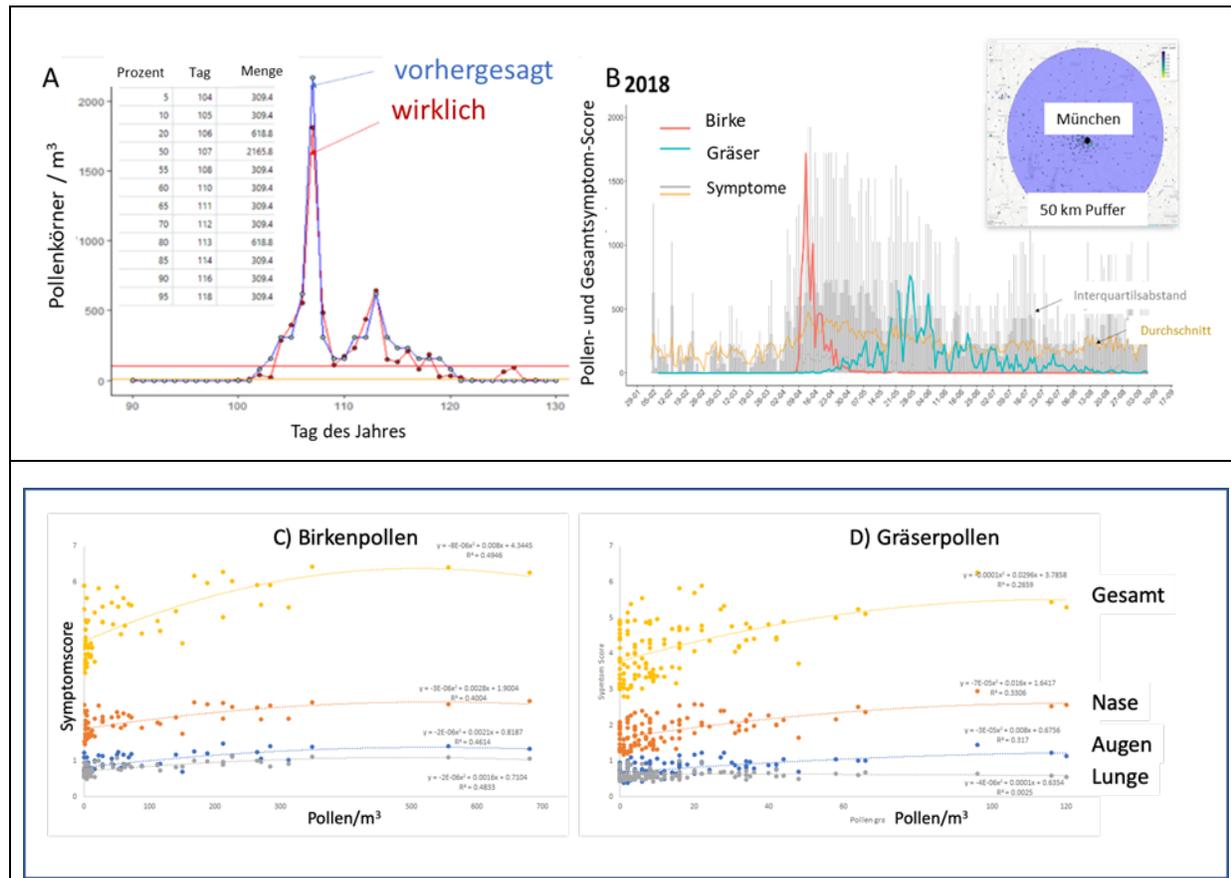


Abb. 4.13: (A) Beispiel einer Rekonstruktion einer Pollenkurve (*M6, Anhang 11.2*) durch sukzessive Anwendung von 5 % der phänologischen Tage und 5 % des jährlichen Pollenintegrals im Vergleich zur gemessenen Pollenkurve für 2018 auf Basis vorhandener Pollenflugdaten. Die rote horizontale Linie bedeutet 100 Pollen/m³, die gelbe Linie 50 Pollen/m³ (Allergie-Risikogrenzen nach Pfaar et al., 2017 [40]). (B) Zusammenhang zwischen Pollenflug in München und Allergiesymptomscore (entnommen aus dem PHD) in einem Umkreis von 50 km um München. (C) PollenEffekt Kurve für Birke, D) PollenEffekt Kurve für Gräser (beide nicht benutzt, dafür aber Anzahl der Tage >100 für Birke und >50 Pollen/m³ für Gräser). Für C und D alle Kurven p<0.001, außer für Lunge und Gräser (*M10 und extern M4, Anhang 11.2*).

4.2.7 Zukunftsprojektionen und Schlussfolgerungen

Wir fanden im Projekt, dass das Klima in Bayern seit Beginn der Pollenflugaufzeichnung (München 1989) signifikant kontinentaler geworden ist, d.h. die Winter sind kälter (nicht signifikant kälter, aber nicht wärmer) und die Sommer und Herbst sind signifikant wärmer (p<0.05, je nach Gebiet). In Abb. 4.14 ist dies nochmals erläutert: Über die letzten 30 Jahre seit Beginn der Pollenflugaufzeichnung sind die Veränderungen des wöchentlichen Mittelwerts der Tagesmaximaltemperatur (ebenso wie die der Wochen-Mittelwerte der Minimaltemperatur) je nach Woche im Jahr unterschiedlich. Für die Wochen von Februar bis März sind die Mittelwerte zurückgegangen (nicht signifikant), im April haben sie aber zugenommen. Dieser Zeitraum Februar bis April ist insbesondere für die Pollen-freisetzenden Frühblüher ein wichtiger Parameter.

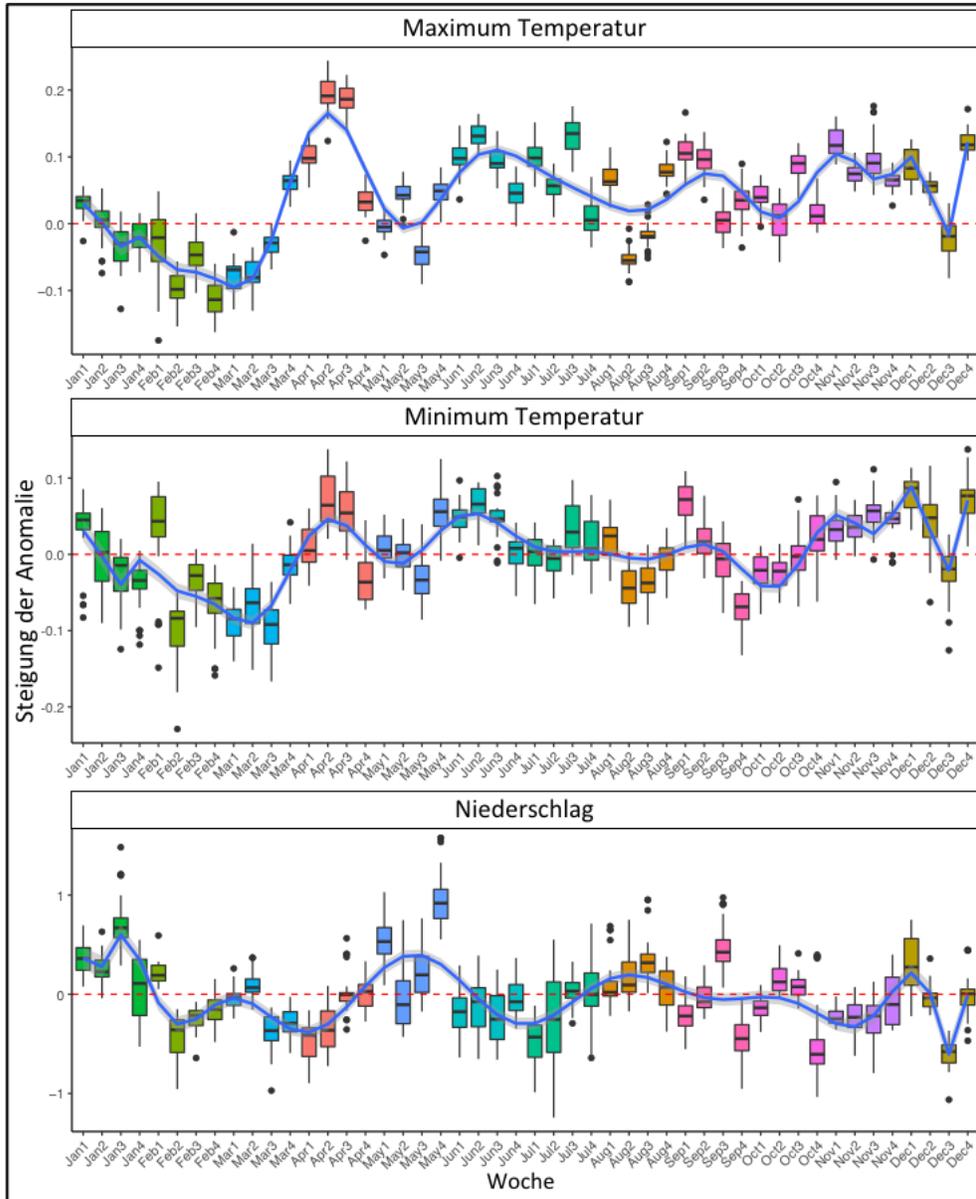


Abb 4.14. Temperaturanomalien pro Woche in den Jahren 1989 bis 2018. Datengrundlage wie bei Abb. 4.3. Steigungen der linearen Regressionskurve für einen Parameter, gemittelt über eine Woche im Jahr, sind angegeben. Ein Wert >0 bedeutet eine Erwärmung, ein Wert <0 eine Abkühlung. Signifikanzen sind für Jahreszeiten berechnet, siehe Abb. 4.3.

Dieses kann sich von Klimaberechnungen von anderen Perioden unterscheiden, aber für die Periode 1989 bis 2018, für welche Pollendaten vorhanden sind, war dies der Fall [35]. Im Projekt konnten wir mit den vorhandenen Pollenflug-Zeitreihen nachweisen, dass diese bereits stattgefundenen Klimaveränderungen mit einem veränderten Pollenflug positiv korrelieren, d.h.

der Pollenflug ist ein guter Bioindikator für den Klimawandel. Zukünftige Änderungen im Pollenflug bis 2100 haben wir modelliert. Dazu wurde mit den historischen Daten modelliert, in welchem Maß bestimmte Klimaparameter Menge, Anfang, Höhepunkt und Ende der Pollenflugsaison beeinflussten. Diese Modelle wurden validiert, indem die damit auf Basis der Klimaparameter der Vergangenheit berechneten Pollenwerte mit den tatsächlich gemessenen Pollenwerten der jeweiligen Vergangenheit verglichen wurden. Nach dieser Validierung wurde in die Zukunft modelliert. Die für Bayern zu erwartenden Klimaparameter wurden den LfU-Modellen entnommen. Wir entwickelten separate Modelle für Jahrespollenintegral (Gesamtmenge an Pollen pro Jahr), Anfang, Höhepunkt und Ende der Pollenflugsaison von Birke [*Betula*] und Gräserpollen [*Poaceae*]), sowie für die Zeitpunkte der Quantile der Jahrespollenmenge in 5 %-Schritten (d. h. wann sind 5 %, wann 10 %, ... der jährlichen Gesamtmenge emittiert). Neu an unserer Vorgehensweise ist, dass nicht nur der Effekt von Klimaparametern auf bestehende Pflanzenpopulationen berücksichtigt wurde, sondern dass mit der Langfristigkeit der Modellierungen auch die zu erwartende Pflanzenverbreitung berücksichtigt wurde. So konnte die gesamte Exposition mit z. B. Birkenpollen in einer Region berechnet werden, indem die Emission von Pollen pro Baum, die möglicherweise zunimmt, mit dem zu erwartenden Bestand in einer Region kombiniert wird, der möglicherweise stark abnimmt, wodurch die Gesamtexposition mit Birkenpollen in dieser Region abnimmt. Es wurde für jedes Jahr und Gebiet die zu erwartende Pollenflugkurve (abhängig vom Pollentyp und vom Klimawandelszenario RCP 2.6; 4.5; und 8.5) rekonstruiert. Damit modellierten wir, wie der Pollenflug sich in Bayern entwickeln wird. Unsere Modellierungen sind interaktiv abrufbar auf den Webseiten:

<https://geoserver.geo.uni-augsburg.de/klimapollen/> bzw. www.klimapollen.de

Es werden gleitende 30-Jahres-Mittelwerte angegeben, deswegen ist auf der Website max. das Jahr 2085 ablesbar.

Abbildung 4.15 A zeigt, wie die Pollenproduktion der Birke in Zukunft abnehmen wird. Selbstverständlich sind die Änderungen ortsspezifisch d. h. je nach Ort werden die Werte nur wenig abnehmen (in Gebieten mit bereits aktuell wenig Birkenbäumen, z.B. in München) oder stärker (in Gebieten mit aktuell vielen Birkenbäumen, etwa im nicht-alpinen Nordwesten von Bayern, z. B. in der Region Bayreuth-Hof). In Gebieten, die in der Vergangenheit wegen Kälte wenig geeignet für Birkenbäume waren, wird die Birkenpollenbelastung zunehmen (etwa in alpinen Regionen wie z. B. Oberstdorf). Die Änderungen sind besonders ausgeprägt bei dem extremen Klimawandel-Szenario RCP 8.5.

Für Gräser zeigten unsere Modelle ein umgekehrtes Verhalten. Es wird mehr Gräserpollen geben bis 2100, insbesondere unter der Annahme des Klimawandel-Szenarios RCP 8.5. Die Gebietsunterschiede sind hier weniger ausgeprägt als bei der Birke.

Neben der Veränderung der Pollenmenge zeigen unsere Modellierungen außerdem, dass sowohl Birken- als auch Gräserpollen in ganz Bayern früher im Jahr fliegen werden (siehe z. B. Abbildung 4.15 B). Auch hier sind die Änderungen bei RCP 8.5 ausgeprägter als bei den anderen Szenarien, und zudem besonders ausgeprägt im alpinen Bereich. In Bayern ist der alpine Bereich am sensitivsten für den Klimawandel, was deutlich an dem prognostizierten verstärkten Pollenflug allergener Pollen zu erkennen ist.

Die Allergie-Symptomatik wird sich auch ändern. Es ist in jedem Fall nicht so, dass der Pollenflug bereits jetzt so hoch (oder niedrig) ist, dass die modellierten Veränderungen keinen Effekt auf die Allergiesymptomatik zeigen würden. Abbildung 4.15 C belegt, dass die Allergie-Symptomatik positiv mit der Pollenbelastung (Pollenzahl) aus Abb. 4.15 A korreliert. Die Belastungsgrenzwerte sind der Literatur entnommen. Tage mit mehr als 100 Birkenpollen/m³ werden weniger, insbesondere im Nordwesten von Bayern. Dagegen nehmen Tage mit mehr als 50 Gräserpollen/m³ in Bayern zu. Die Allergie-Symptomatik in Bayern aufgrund von Birkenpollen wird abnehmen, die aufgrund von Gräserpollen zunehmen.

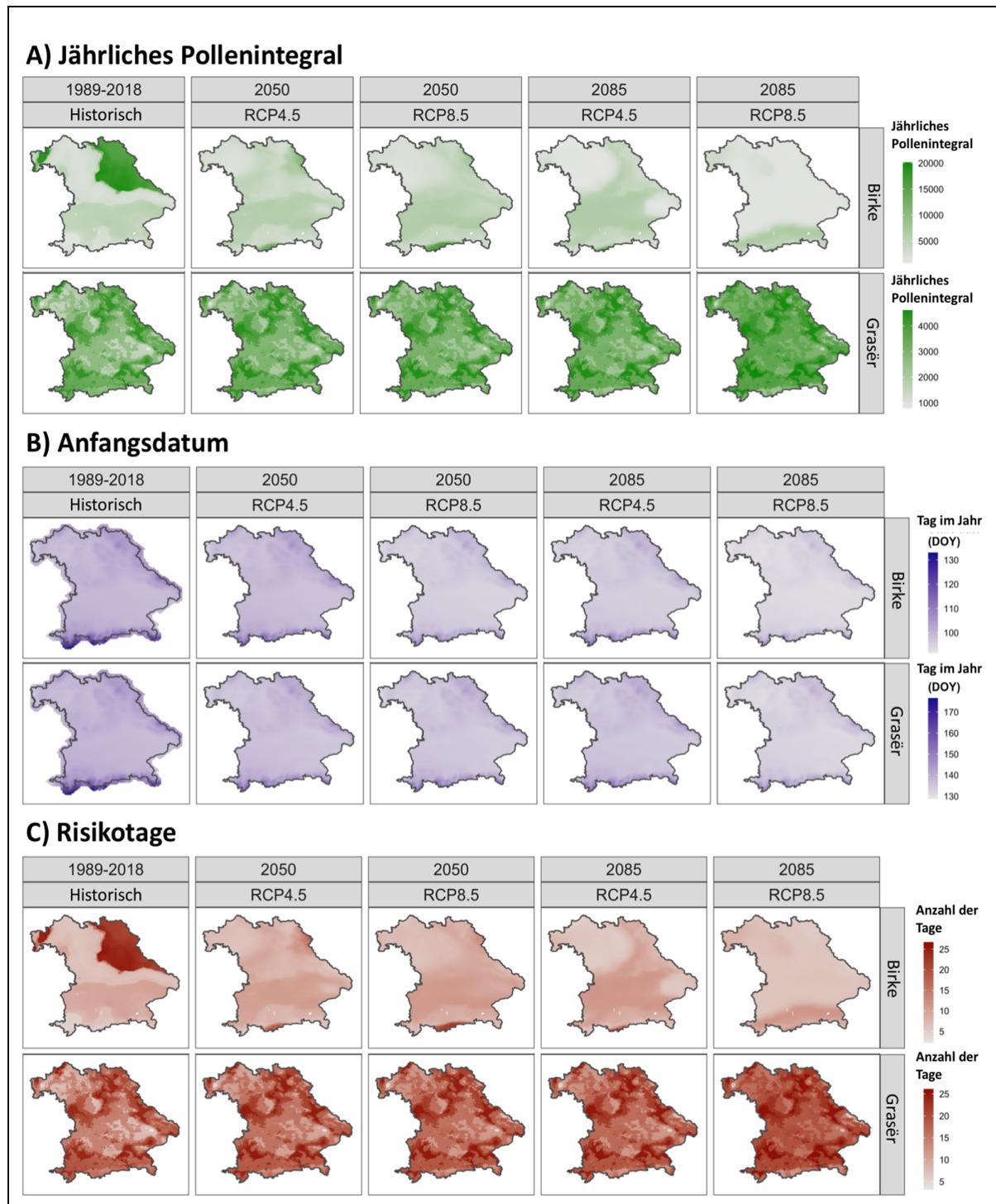


Abb. 4.15: Vorhersage der Pollenflugsaison in Abhängigkeit von verschiedenen Klimawandelszenarien. (A) Menge an Pollen (jährliches Pollenintegral) (B) Anfangsdatum des Pollenflugs; (C) Tage mit Pollen oberhalb der Grenzwerte, ab denen Pollen-Allergie-Symptome ausgelöst werden können. Nach Rücksprache mit LGL (Frau Dr. Zink) würde auf die Modellierung für Esche wegen Zeitgründen verzichtet (M10-Esche).

5 Einfluss des Klimawandels und der Landnutzung auf den blüh- und pollenphänologischen Kalender in Bayern (Teilprojekt 2)

Da neben dem Klimawandel auch Landnutzungsänderungen den blüh- und pollenphänologischen Kalender beeinflussen, war es Ziel des Teilprojekts 2 regional zu untersuchen, wie entsprechende Faktoren neben der Klimaerwärmung in Bayern wirken. Dazu wurden vier Themen bzw. Fragestellungen bearbeitet.

- (1) Pollentransportklimatologie für Bayern – wann sind lokale Emissionen bzw. Ferntransport ausschlaggebend für den Beginn der verschiedenen Pollensaisons?
- (2) Validierung der Pollentransportmethodologie am Beispiel Erle – sind hohe *Alnus*-Pollenkonzentrationen im Juni auf die Blüte der alpinen Grünerle zurückzuführen?
- (3) Einfluss von Landnutzungsänderungen auf Gräser-Pollenemissionen – verändern Mahdtermine und –häufigkeiten potentielle Pollenquellen und damit Konzentrationen?
- (4) Etablierung der Zweigmethode für Untersuchungen zu Polleneigenschaften allergener Baumarten – sind Pollen, die unter experimentellen und natürlichen Bedingungen gereift sind, in ihren Eigenschaften vergleichbar?

In den folgenden vier Kapiteln werden die Ergebnisse dieser Studien beschrieben, für einen vollständigen Überblick einschließlich aller Abbildungen, Tabellen und Anhänge wird auf die Originalpublikationen (Kapitel 11.3) verwiesen.

5.1 Pollentransportklimatologie für Bayern

Der Einfluss des Klimas auf die Pollensaison ist gut beschrieben, jedoch ist weniger darüber bekannt, wie häufig atmosphärischer Transport auf der „Lang- und Mittelstrecke“ den Beginn der Pollensaison beeinflusst bzw. verfrüht. Die Länge der Pollensaison sowie hohe Pollenkonzentrationen sind jedoch von großer gesundheitlicher Relevanz. In dieser Studie wurden deshalb Veränderungen in der Pollensaison anhand von Blüh- und Pollenflugdaten (1987-2017) für sieben Pollentaxa in Bayern untersucht und jährliche Startdaten für die Pollen- bzw. Blühsaison verglichen, um nicht-lokale Pollenquellen zu identifizieren. Dies wird zusätzlich dadurch erschwert, dass atmosphärischer Pollen oftmals nur auf der Gattungs- (oder Familien)ebene bestimmt werden kann. Während der lokalen Blüte sind Ferntransporte nicht zu differenzieren, und so konzentrierte sich unsere Studie auf den Beginn der Pollensaison, der nicht nur von der Blüte der lokalen, die Station umgebenden Pflanzen abhängt, sondern möglicherweise durch Ferntransport bestimmt wird. Aus der Literatur war bereits bekannt, dass lokale phänologische Beobachtungen alleine nicht ausreichen, um die Pollensaison korrekt zu beschreiben [29]. Auch wenn am Rezeptorstandort lokale Pollenquellen vorhanden sind, können weitverfrachtete Pollen die atmosphärische Konzentration und die Länge der Pollensaison regional maßgeblich mitbeeinflussen.

In dieser Studie wurde erstmals für Bayern systematisch zwischen lokalen und eingetragenen Pollenquellen differenziert. Dabei wurde die Wahrscheinlichkeit des Pollentransports mit Hilfe von HYSPLIT-Rückwärtstrajektorien analysiert, basierend auf den Transportbahnen der Luftpakete und der Verbreitung bzw. jährlichen Blühdaten in den entsprechenden Quellregionen (M 11, Anhang 11.2). Die Studie „*A First Pre-season Pollen Transport Climatology to Bavaria, Germany*“

von Annette Menzel, Homa Ghasemifard, Ye Yuan und Nicole Estrella wurde bereits in der internationalen, begutachteten Zeitschrift „*Frontiers in Allergy*“ im Jahr 2021 veröffentlicht [63]. Sie ist im Kapitel 11.3 Publikationen vollständig abgedruckt.

5.1.1 Daten & Methoden

Pollendaten des Deutschen Polleninformationsdienstes (PID) lagen als tägliche atmosphärische Konzentration (Pollenkörner pro m³) für den Zeitraum 1987 bis 2017 an sechs bayerischen Stationen vor, Oberjoch im Alpenraum, München und Zusmarshausen in der Schotterebene sowie Münnerstadt, Bamberg und Erlangen im wärmeren Franken. Wir haben uns auf *Alnus*, *Artemisia*, *Betula*, *Corylus*, *Fraxinus*, *Pinus* und *Poaceae* konzentriert, für die auch Blühinformationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) verfügbar sind (Abb. 5.1).

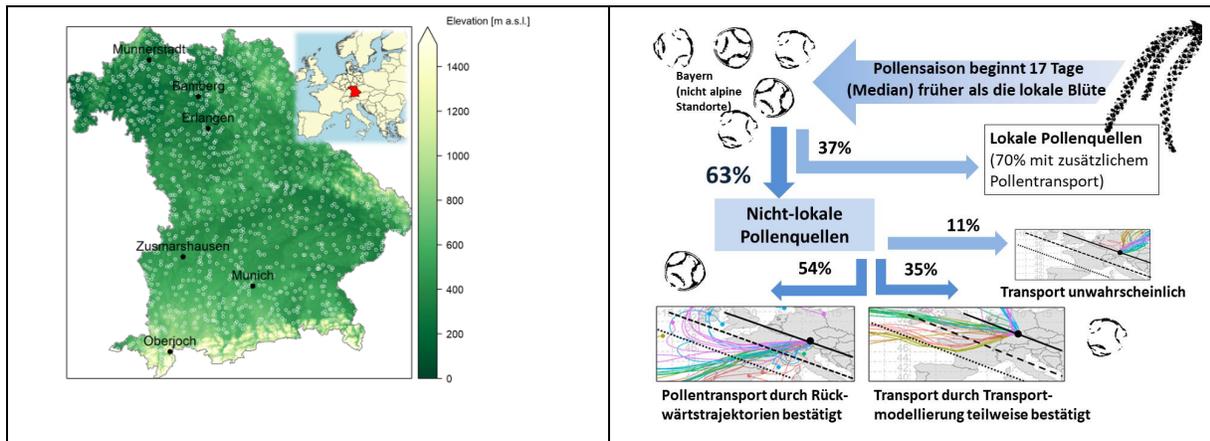


Abb. 5.1: Links: Standorte mit DWD Beobachtungen (weiße Kreise) und sechs PID Standorte mit Pollenmonitoring. Rechts: Graphische Zusammenfassung der Pollentransportklimatologie.

Für jede Station wurden Beginn und Ende der jeweiligen Pollensaison (SOS_P , EOS_P) über die Prozentmethode ermittelt ([41, 64], Cut-off 2,5 %). Zusätzlich wurde das Datum des jährlichen Pollenmaximums ($PEAK_P$) und die jährliche Pollensumme (SUM_P) bestimmt. Anhand von phänologischen Beobachtungen des DWD wurden lokale Blühtermine für den Zeitraum 1987–2017 abgeleitet. Hierfür wurden die Phasen ‚Beginn der Blüte‘ für die Arten *Artemisia vulgaris* L. (Gemeiner Beifuß), *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn. (Schwarzerle), *Betula pendula* Roth (Hängebirke), *Corylus avellana* L. (Haselstrauch), *Fraxinus excelsior* L. (Gemeine Esche), *Pinus sylvestris* L. (Waldkiefer) verwendet sowie ‚Beginn der Vollblüte‘ für die beiden Grasarten *Dactylis glomerata* L. (Wiesen-Knäuelgras) and *Alopecurus pratensis* L. (Wiesenfuchsschwanz). Die jährlichen Beobachtungen wurden in Anlehnung an das DWD Verfahren räumlich interpoliert [65]. Anschließend wurden die sechs nächsten 1 km² Pixel um die Pollenstation gemittelt, um das phänologische Eintrittsdatum SOS_F zu berechnen. Für alle Pollentaxa wurden europäische Verbreitungskarten der wichtigsten Arten zusammengestellt.

Während der Hauptpollensaison lassen sich lokale und transportierte Pollen nicht ohne genetische Analysen unterscheiden, aber der Beginn und das Ende der Hauptpollensaison werden durch die lokale Blühphänologie gut eingrenzt (= lokale Pollenquellen plus nicht zu unterscheidender Transport), während man vor der (durch lokale Blüte bestimmten) Hauptpollensaison ausschließlich von Pollentransport ausgeht. Hierzu war es notwendig, die

phänologischen (Blüh-)daten auf die Standorte der Pollenmessungen räumlich zu interpolieren, was mit einer gewissen Unschärfe verbunden sein kann. Um mögliche Unsicherheiten durch die Interpolation zu verringern, wurde nicht das interpolierte phänologische Eintrittsdatum SOS_F selbst, sondern der Termin 10 Tage vor SOS_F als Stichtag gewählt, d.h. wenn SOS_P weniger als 10 Tage vor SOS_F lag, wurden lokale Quellen angenommen. Wenn der Beginn der Pollensaison dagegen mindestens 10 Tage vor der lokalen Blüte beobachtet wurde, wurde dies als Ferntransport vor der Hauptpollensaison gewertet. Für entsprechende Fälle ($SOS_P \pm 2$ Tage) wurden anschließend 72 Stunden-Rückwärtstrajektorien mit dem HYSPLIT Modell der NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration der USA, siehe Glossar und [63]) erstellt, um potenzielle Quellenregionen zu bestimmen. Über die genannten fünf Tage wurden in drei Stunden Intervallen von 0:00 bis 21:00 diese Trajektorien gestartet, d.h. 8 pro Tag und 40 über den Zeitraum (siehe Abb. 5.3, wo diese Trajektorien entsprechend farblich gekennzeichnet sind). Die Wahrscheinlichkeit für Pollentransport wurde als groß (mittel) eingestuft, wenn in der möglichen Herkunftsregion durch die HYSPLIT Trajektorien (SOS_T) die jeweiligen Art(en) bereits (teilweise) blühten (siehe [66]).

5.1.2 Ergebnisse

Frühblüher verschoben ihre Pollensaison stärker (z.B. *Corylus* und *Alnus* um bis zu 2 Tage pro Jahr) als Arten, die im mittleren Frühjahr (*Betula*, *Fraxinus*, *Pinus*) blühen. *Poaceae* und *Artemisia* im Sommer zeigten dagegen uneinheitliche Trends. Jährliche Pollensummen nahmen hauptsächlich für *Corylus* zu und für *Poaceae* und *Artemisia* ab. Trends für den Start bzw. Blühsaison waren weitgehend unterschiedlich, insbesondere bei *Corylus* und *Alnus* (Abb. 5.2).

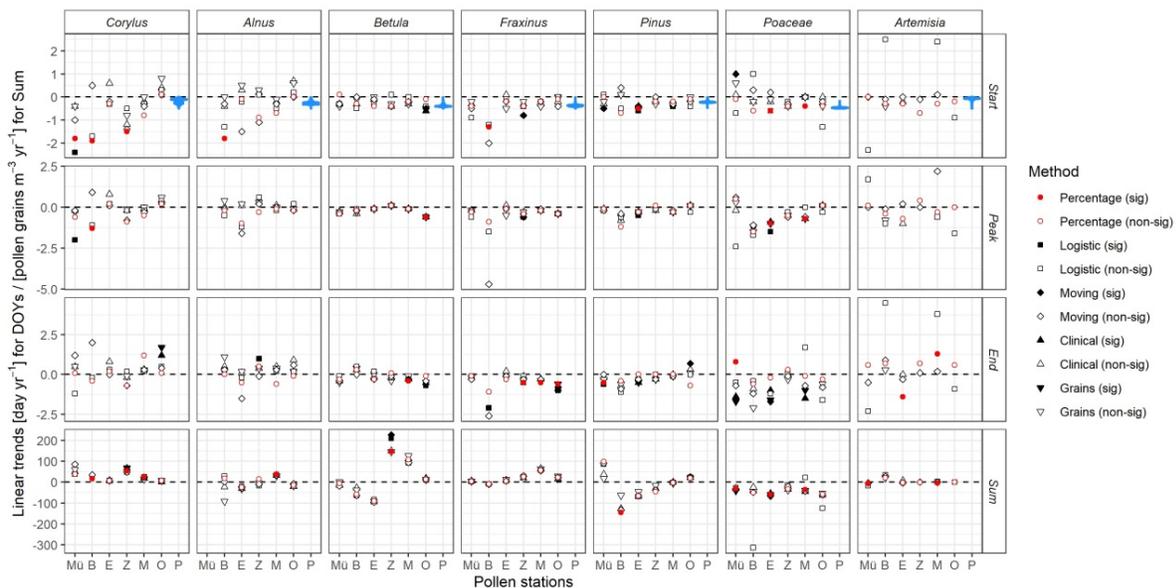


Abb. 5.2: Trends für Start, Peak, Ende sowie Jahressumme der Pollenkonzentrationen für sechs ausgewählte PID Stationen in Bayern. Die Pollensaison wurde mit verschiedenen Methoden bestimmt (siehe [63])

Transportphänomene, die auf Vergleichen zwischen Blüh- und Pollenterminen beruhen, konnten für drei Stationen und den Zeitraum 2005-2015 ermittelt werden. Ein überraschendes

Ergebnis unserer Studie ist (Abb. 5.2 rechts): Pollen, der vor der lokalen Blüte in der Atmosphäre gemessen wird, ist ein häufiges Phänomen: Im Durchschnitt (Median) über alle Jahre / Arten wurde der erste Pollen in der Luft 17 Tage früher als die lokale Blüte beobachtet. Bei 63 % der Beobachtungen (außer bei *Artemisia* und *Poaceae* und dem alpinen Standort) waren die Quellen des ersten Pollens im Jahr nicht lokal. In 54 % (35 %) dieser Fälle bestätigten die Rückwärtstrajektorien den vorsaisonalen Transport (teilweise), nur in 11 % der Fälle konnte die Transportmodellierung die Pollenherkunft nicht abschließend klären. Dabei konnte der Pollen auch relativ weit transportiert werden, wie das Beispiel A in Abbildung 5.3 zeigt, wo *Corylus* Pollen wahrscheinlich vom Nordwesten der Iberischen Halbinsel stammt und 17 Tage vor der lokalen Haselblüte in München mit mittleren Konzentrationen registriert wurde. Selbst innerhalb der Hauptpollensaison konnten 70 % der Startdaten der Pollensaison mit Transportphänomenen in Verbindung gebracht werden. An der alpinen Station Oberjoch überwogen nicht-lokale Pollenquellen (sowohl von außerhalb Bayerns als auch aus dem bayerischen Tiefland), in nur 13 % dieser Fälle konnte der Transport nicht durch Rückwärtstrajektorien bestätigt werden.

Mit dieser Klimatologie konnte erstmals gezeigt werden, dass Pollentransport vor der lokalen Blühsaison in Bezug auf Häufigkeit und allergologisch relevante Konzentrationen eine herausragende Rolle spielt. Dies hat wichtige Implikationen für die Länge, den Zeitpunkt und die Schwere der allergenen Pollensaison. Gerade zu Beginn der Pollensaison sollte deshalb die Rolle lokaler Pollenquellen (Blüte) mit Vorsicht bewertet werden.

		Description	HYSPLIT back trajectories from Erlangen/Munich
Non-local pollen sources (n=57)	A (n=31)	<p><i>Corylus</i>, Munich, 2010</p> <p>SOS_P DOY 56 16 (90) pollen grains m⁻³</p> <p>SOS_F DOY 73</p> <p>pre-season transport confirmed</p>	
	B (n=20)	<p><i>Fraxinus</i>, Erlangen, 2008</p> <p>SOS_P DOY 63 4 (14) pollen grains m⁻³</p> <p>SOS_F DOY 106</p> <p>pre-season transport partly confirmed</p>	
	C (n=6)	<p><i>Alnus</i>, Munich, 2013</p> <p>SOS_P DOY 53 1 (4) pollen grains m⁻³</p> <p>SOS_F DOY 75</p> <p>pre-season transport rejected</p>	
Local sources (n=33)	D (n=23)	<p><i>Pinus</i>, Munich, 2012</p> <p>SOS_P DOY 131 170 (1922) pollen grains m⁻³</p> <p>SOS_F DOY 133</p> <p>additional long-range transport likely</p>	
	E (n=10)	<p><i>Betula</i>, Erlangen, 2007</p> <p>SOS_P DOY 95 20 (125) pollen grains m⁻³</p> <p>SOS_F DOY 101</p> <p>only local sources likely</p>	

Abb. 5.3: Ausgewählte Beispiele für den Start der Pollensaison (SOS_P) in Bezug auf die lokale Blühsaison (SOS_F, beides in DOY = Tag seit Jahresbeginn) und den entsprechenden HYSPLIT Rückwärtstrajektorien für das SOS_P Datum (grün) sowie die zwei vorherigen und nachfolgenden Tage (näheres im angefügten Artikel). Die Pollenkonzentration bezieht sich auf den Tag des SOS_P, in Klammern ist die Summe für die entsprechenden fünf Tage angegeben. Die schwarzen Linien zeigen die Blühtermine, die identisch mit SOS_F sind, die gestrichelten Linien 10 und 20 Tage vor

SOS_F an. Die Beispiele repräsentieren 90 Fälle für fünf Pollentaxa (*Alnus*, *Betula*, *Corylus*, *Fraxinus*, und *Pinus*) der Stationen Erlangen und München.

5.2 Verlängerung der Erlen-Pollensaison durch Ferntransport

In dieser Studie wurde untersucht, wie stark sich das Ende der lokalen Pollensaison durch eingetragene Erlenpollen (*Alnus*) verlängert (sogenannte Post-Season Episoden). Gleichzeitig diente diese Untersuchung auch zur Validierung der Untersuchungsmethode der Identifikation von Pollentransport mittels HYSPLIT Trajektorien sowie zusätzlichen Informationen zu Artverbreitung und Blühterminen. *Alnus* Pollen sind mit die wichtigsten Aeroallergene in der Nordhemisphäre. In Mitteleuropa wird diese Gattung durch drei Arten repräsentiert (*Alnus glutinosa*, *Alnus incana* und *Alnus viridis*). Die sehr häufige Schwarzerle (*A. glutinosa* (L.) Gaertn) ist in Auwäldern, auf nassen Standorten und an Waldrändern weit verbreitet. Die Hauptpollensaison der Schwarzerle erstreckt sich von Februar bis März, aber im ePIN Datensatz war eine zusätzliche sechstägige Nachepisode im Juni 2015 an 10 von 26 Pollenstationen in Bayern augenfällig. Für diese Episode und alle Standorte wurden ebenfalls 72-Stunden-Rückwärtstrajektorien in 3-Stunden-Intervallen unter Verwendung von räumlich und zeitlich hoch aufgelösten ERA5-Reanalysedaten und dem HYSPLIT-Modell (hybrid single-particle Lagrangian integrated trajectory) berechnet, um die Herkunft dieser späteren Erlenpollen zu untersuchen.

Die Studie „*High post-season Alnus pollen loads successfully identified as long-range transport of an alpine species*“ von Homa Ghasemifard, Wael Ghada, Nicole Estrella, Marvin Lüpke, Jose Oteros, Jeron Buters und Annette Menzel wurde bereits in der internationalen, begutachteten Zeitschrift „*Atmospheric Environment*“ im Jahr 2020 veröffentlicht [67]. Sie ist im Kapitel 11.3 Publikationen vollständig abgedruckt.

Die graphische Zusammenfassung in Abb. 5.4 zeigt exemplarisch für die Stationen Bayreuth im Norden und Trostberg im Süden Bayerns die Unterschiede in der Länge der *Alnus*-Pollensaison. In Trostberg kommt es zu einer Post-Season Episode, die sich durch den Verlauf der Trajektorien als Grünerlenpollen identifizieren lässt.

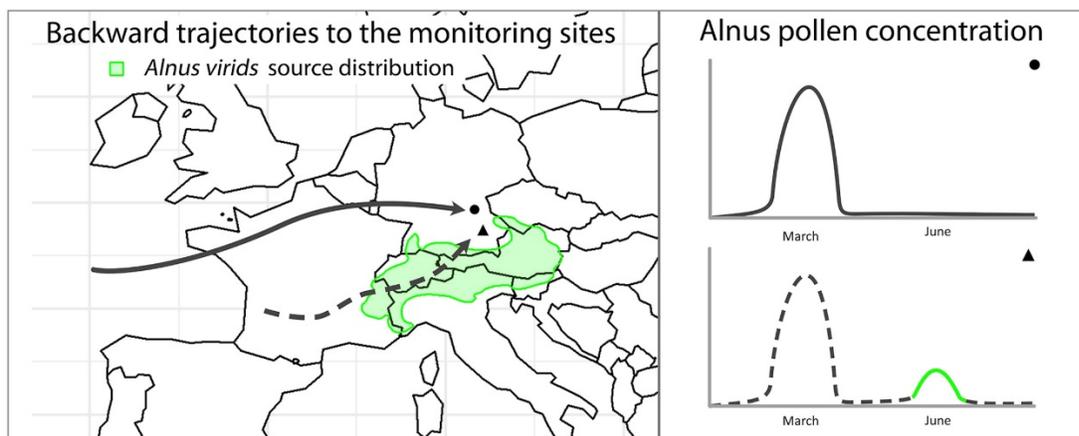


Abb. 5.4: Darstellung von zwei Rückwärtstrajektorien (links). Die gestrichelte Rückwärts-Trajektorie der Station Trostberg überstreicht das Verbreitungsgebiet der Grünerle (*Alnus viridis*), das als potenzielle Quellregion in Frage kommt, die dazugehörige Pollenkonzentration rechts zeigt diese nachsaisonale Episode an. Die schwarze Trajektorie für die Station Bayreuth dagegen verläuft nördlich, hier wurden im Juni keine Erlenpollen registriert (rechts oben).

5.2.1 Daten & Methoden

Im Jahre 2015 wurden im Rahmen des elektronischen Polleninformationsnetzes (ePIN) an 26 Stationen in Bayern zwischen dem 15. März und dem 14. September *Alnus*-Pollen zusammen mit 14 anderen Pollentaxa mit Hirst Pollenfallen erfasst. Dabei wurde die täglichen atmosphärischen Pollenkonzentrationen als Pollenkörner pro Kubikmeter Luft angegeben (Körner/m³). Ergänzt wurden diese Daten durch Pollenzählungen der Stiftung Deutscher Polleninformationsdienst (PID) für die Station Oberjoch für den Zeitraum von 1995 – 2017.

Basierend auf Daten des Deutschen Wetterdienstes wurde der Beginn der Schwarzerlenblüte für das Jahr 2015 räumlich interpoliert, aus der die entsprechenden Termine an den 26 Pollenstationen ermittelt wurden. Wie bereits in der vorherigen Studie (Kapitel 5.1) wurden auch hier Rückwärtstrajektorien mit dem HYSPLIT Model erstellt, um potentielle Quellenregionen der Post-Season Pollenpeaks zu bestimmen.

5.2.2 Ergebnisse

Durch die Rückwärtstrajektorien konnten Luftmassen aus dem Alpenraum der Schweiz und Österreichs, in dem relevante Gebiete von Grünerle (*A. viridis* (Chaix) DC) existieren, als potenzielle Pollenquellen identifiziert werden. Obwohl alle Trajektorien ähnliche Muster für die 26 Stationen in der ersten Juniwoche 2015 aufwiesen, verzeichneten nur 10 Standorte eine relevante *Alnus*-Pollenkonzentration (≥ 3 Körner/m³) für mindestens einen Tag der sechstägigen Episode (insgesamt 23 Tage). Dies lässt sich durch die Zugbahnen der Luftmassen erklären, denn die Häufigkeit des Überfliegens der potenziellen Quellregion unterscheidet sich. An den 23 Tagen mit höheren *A. viridis*-Konzentrationen an 10 Standorten überstrichen 48 % der Trajektorien die potenzielle Quellregion, im Gegensatz dazu passierten 82 % der Trajektorien an Episodentagen oder Standorten ohne *Alnus*-Pollen diese Quellregion nicht.

Um diese Ergebnisse zu validieren, wurde eine Auswertung der *Alnus*-Pollenkonzentrationen über 23 Jahre (1995 bis 2017) an der Station Oberjoch durchgeführt (Abb. 5.5 a). Diese zeigte im Mittel zwei Peaks, zwischen denen sich mindestens eine Woche befand, in der die Konzentration von Erlenpollen sehr gering war.

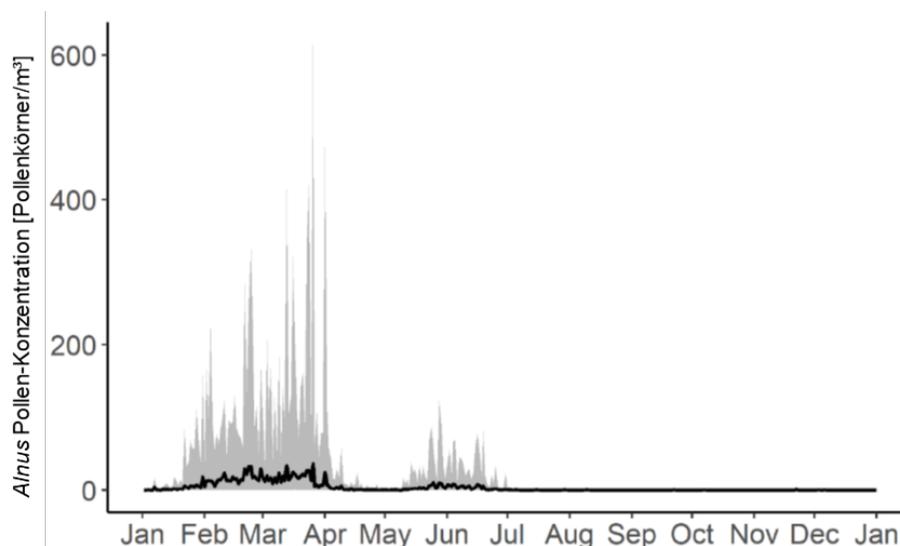


Abb. 5.5 a: *Alnus* Pollen Konzentration an der Station Oberjoch über 23 Beobachtungsjahre (1995–2017). Schwarze Linie: Durchschnittliche Pollenkonzentration über den Untersuchungszeitraum; graue Schattierung: Maximale und minimale Pollenkonzentration für jeden Tag während des Untersuchungszeitraums

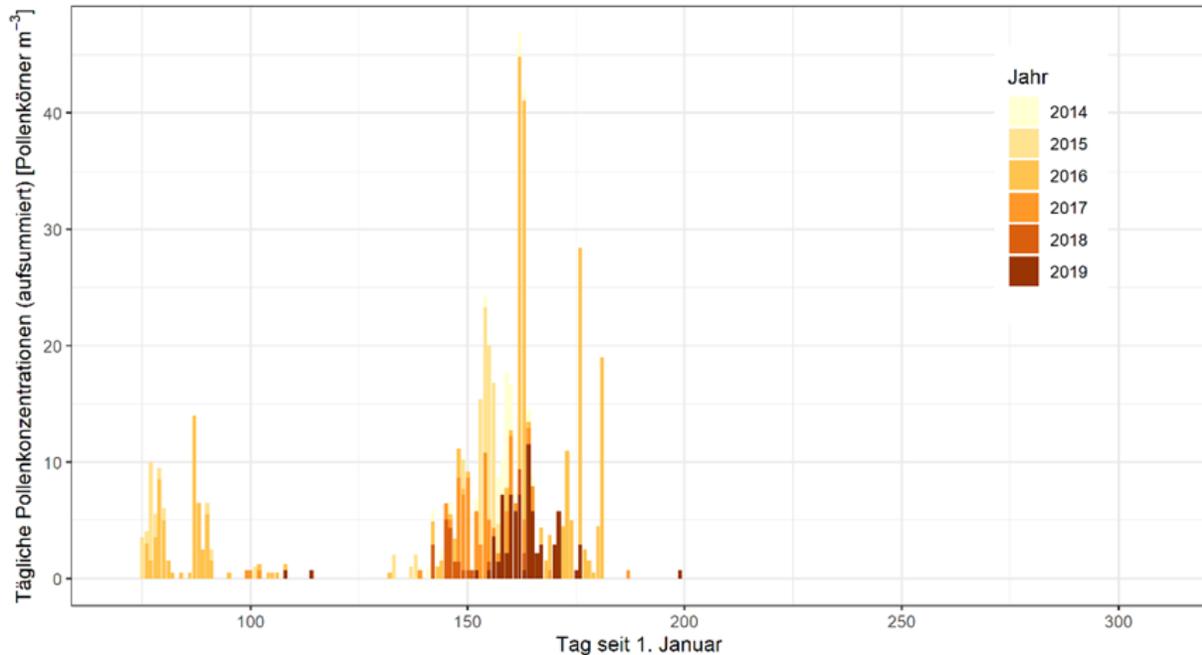


Abb. 5.5 b: *Alnus* Pollen-Konzentration an der Station Schneefernerhaus über sechs Beobachtungsjahre (2014-2019).

Der erste Peak ist höchstwahrscheinlich auf *A. glutinosa* Pollen zurückzuführen, der zweite Peak kann *A. viridis* Pollen zugeschrieben werden. Die maximale Konzentration an Erlenpollen in der Hauptsaison betrug 614 Körner/m³ im März 2006, und die maximale Konzentration in der Nachsaison 124 Körner/m³ im Mai 2005 (Abb. 5.5). Die späte Blüte von *A. viridis* könnte also die Nachsaison-Episoden im Juni erklären.

Die *Alnus* Pollen-Konzentration an der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (2650 m a.s.l.) zeigt über sechs Beobachtungsjahre (2014-2019) ein ähnliches zweites Maximum in der Pollen-Konzentration, in etwa für den Zeitraum 19. Mai (140 TSJ) bis 28. Juni (180 TSJ) (Abb. 5.5 b). Die Umweltforschungsstation liegt ca. 1500 m höher als die Station Oberjoch, deshalb ist der zweite Grünerlenpeak im Juni stärker ausgeprägt. Die *Alnus* Pollen-Konzentrationen im März und April, die durch Transport von Schwarzerlen und Grauerlenpollen aus dem Flachland bedingt sind, fallen an dieser subalpinen Station sogar noch geringer aus.

5.3 Landnutzung und Gräser-Pollenemissionen in Bayern

Veränderte Umweltbedingungen führen zu Anpassungen in der Pflanzenwelt. Besonders Allergiker sind davon direkt betroffen, da Änderungen in der Blühperiode oder die Menge von allergenen Pollen in der Luft sich direkt auf Dauer und Stärke der Beschwerden auswirken. Grünland umfasst ca. ein Drittel der landwirtschaftlich genutzten Fläche Bayerns. Daher ist es für Prognosen von essentieller Bedeutung, dessen Einfluss und deren Änderungen durch den Klimawandel auf den Gräser-Pollenflug festzustellen. Heuschnupfen im Zusammenhang mit Gräserpollen tritt hauptsächlich von Mai bis Juli auf, v.a. beim Höhepunkt der Pollenemission Anfang Juni, d.h. wenn die meisten Gräser zu blühen beginnen. Es überwiegen lokale Quellen, da im Vergleich zu anderen windbestäubten Arten die Korngröße von Gräserpollen (30-55 Mikrometer) relativ groß und die Freisetzungshöhe niedrig ist, was atmosphärischen Ferntransport erschwert. Dies erklärt auch, warum die Konzentration in den ersten 10 m über Grund stärker abweicht als bei Birkenpollen [68]. Bis zu 3000 Arten können zur gemessenen *Poaceae* Pollenkonzentration beitragen. Zudem spielen Sorten und Varietäten [69] und die Art der Bewirtschaftung eine Rolle, insbesondere Schnitttermine [70]. Allerdings ist insbesondere das Wissen über Landnutzungstypen, die potenziell Pollen emittieren können, und die Relevanz lokaler Quellen noch begrenzt. Hier wurde deshalb der Einfluss der Landnutzung (Nutzungsintensität, Bewirtschaftung) auf die Pollenkonzentration von Gräsern in Bayern untersucht [71]. Die Vorarbeiten durch die Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) (*Extern M7, Anhang 11.2*, siehe auch ausführlicher Bericht in Kapitel 10.5) fließen dann in abschließende Untersuchung (*M12, Anhang 11.2*) ein.

5.3.1 Daten & Methoden

Für den vorbereitenden Projektteil der (LfL) (*Extern M7*, siehe ausführlicher Bericht in Kapitel 11.5) wurden die Landnutzungsdaten des überwiegenden Grünlandes (InVeKos-Datenbank) sowie Managementdaten im Grünlandbereich (KULAP Maßnahmen) anonymisiert für Bayern und für vier Testgebiete (Kempten/Schwaben, Steinach/Niederbayern, Triesdorf/Mittelfranken und Freising/Oberbayern) aufbereitet und ausgewertet.

Daten zur Gräserblüte wurden aus DWD Daten für alle Standorte interpoliert [65] (siehe Abb. 5.6 rechts). Daten zur Graspollenkonzentration stammen aus der ePIN Meßkampagne im Jahr 2015 an 25 Standorten in Bayern, ergänzt um zwei weitere Stationen von TUM und UNIKA-T (Abb. 5.6 links). Die Pollenkonzentrationen wurden mittels Hirst-Pollensammlern gemessen und lagen in einer täglichen Auflösung vor. Daraus wurden API (aufsummierte tägliche Pollenkonzentrationen während der Hauptpollensaison) und PP (maximale tägliche Pollenkonzentration während der Hauptpollensaison) berechnet.

Aus den aufbereiteten InVeKos Daten wurden 40 verschiedene Landnutzungen, die Gräser enthalten, wie z. Bsp¹. Wiesen (InVeKos Nr. 451), Mähweiden (452), Weiden (453), Hutungen zu Futternutzung, (62), Anerkannte Almen, Alpen (455), Sommerweiden für Wanderschafe (460), Streuwiesen zur Streu- und Futternutzung (458) (siehe Tabelle 2 in [71]), ausgewählt, alle nichtlandwirtschaftlichen Grasflächen wurden aus OpenStreetMap extrahiert. Der Einfluss der

¹ 89% des gesamten Dauergrünlands in Bayern wird von Wiesen (InVeKos 451) und Mähweiden (Nr. 452) eingenommen.

Landnutzung auf die Pollenkonzentration wurde unter Anwendung der konzentrischen Ringmethode von Oteros *et al.* (2015) untersucht [54]. Hierfür wurde der 30 km Umkreis einer Pollenstation innerhalb der bayerischen Landesgrenzen in konzentrische Ringe mit 500 Meter Radius unterteilt. Für die einzelnen Ringe wurde dann der Graslandanteil berechnet sowie Nutzungsintensitäten und Windrichtung berücksichtigt. Die Nutzungsintensität wurde anhand der betriebsspezifischen Kennzahl RVG/ha HFF (Verhältnis der Raufutter verzehrenden Großvieheinheiten zu einem Hektar Hauptfutterfläche) bestimmt, wobei mehr Tiere eine intensivere Nutzung vermuten lassen. Flächen mit extensiver Nutzung (spätere und weniger Schnitttermine) bekamen eine höhere Wichtung für die Pollenemission. Die Gewichtung der Windrichtung in NO, NW, SO und SW erfolgte anhand ihrer Häufigkeitsverteilung während der Hauptpollensaison. Der Zusammenhang zwischen Landnutzung und Pollenkonzentration wurde in Abhängigkeit von der Distanz dargestellt (Abb. 5.7).

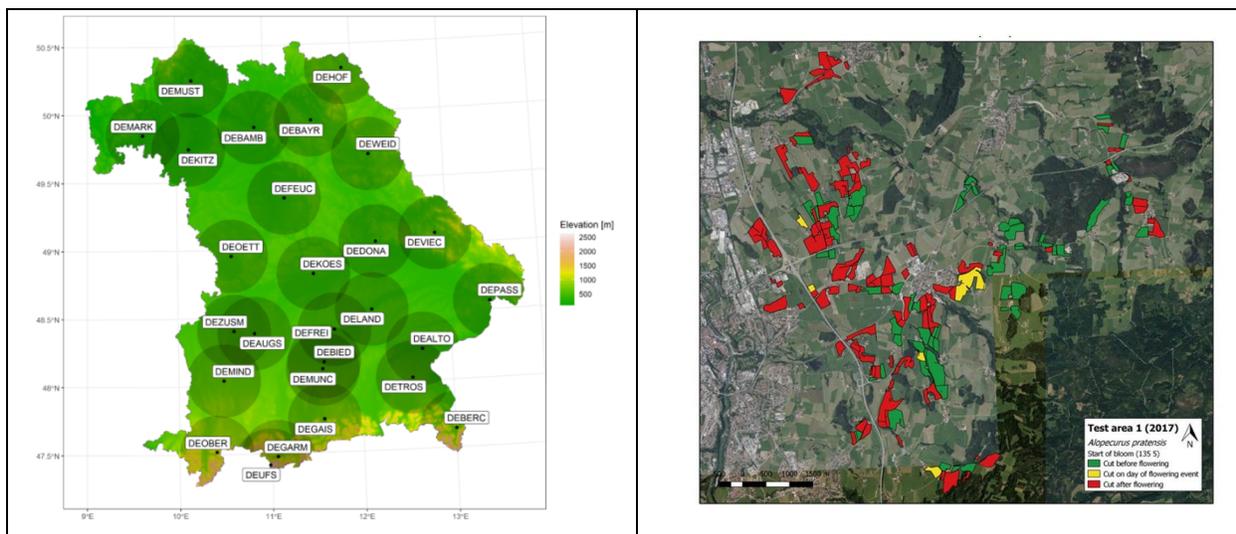


Abb. 5.6: Links: Standorte der 27 Pollensammler im Jahr 2015 in Bayern. Die dunkel hinterlegten Kreisflächen entsprechen dem jeweiligen 30 km Umkreis. Rechts: Beispielparte der potenziellen Pollenemissionsflächen im Testgebiet Kempten (2017) in Abhängigkeit von der Blüte des Wiesenfuchsschwanzes.

5.3.2 Ergebnisse

Auf Grund der Vielfalt der Grünlandaufwüchse wurde modellhaft für die Testgebiete der potenzielle Einfluss zweier typischer Futtergräser (Gewöhnliches Knäuelgras (*Dactylis glomerata*) und Wiesen-Fuchsschwanz (*Alopecurus pratensis*)) auf die Pollenemission regional genauer untersucht (Abb. 5.6). Der Zeitpunkt des ersten Schnittes wird in der Regel so gewählt, dass der Blühbeginn noch nicht eingetreten ist, um eine optimale Futterqualität zu gewährleisten. Folglich können Pollenflug und langanhaltende Pollenemission kaum von diesen Flächen ausgehen. Diese Annahme orientiert sich an Blühterminen frühblühender Futtergräser als Schnittindikatoren, da diese mit hoher Stetigkeit in den Beständen vertreten sind, auf den folgenden Blühbeginn der Aufwüchse hinweisen und den Landwirten sehr häufig als Schnittindikatoren dienen. Pollenemission durch frühblühende Gräser können jedoch nicht ausgeschlossen werden, da die Artzusammensetzungen bei Grünflächen nur auf interpolierten Daten von Kuhn *et al.* (2011) basieren [72]. Für die Flächen, bei denen diese frühblühenden Arten nicht Leitgras sind, kann generell von einem späteren Schnitttermin ausgegangen werden, da der Trockenmasseertrag bis zur Blüte zunimmt, während die Futterqualität beim Schieben des

Blütenstandes und der dann beginnenden Lignifizierung des Stängels noch während der Pollenemission weiter sinkt. Der optimale Schnitttermin wird dann somit vom Entwicklungsstadium des jeweiligen Leitgrases definiert. Für die Testflächen zeigte sich deutlich, dass mit Erhöhung der Schnitffrequenz die Wahrscheinlichkeit der Pollenemission exponentiell abnimmt (Abb. 5.7 links). Davon ausgenommen sind jedoch fast alle Agrarumwelt- und Klimamaßnahmen (AUM) Flächen (siehe Glossar und Punkte 3.4 in Kapitel 11.5), da ihr Schnitt erst nach einem spezifischen Datum durchgeführt werden darf und somit deren Pollen zur Gesamtemission, besonders in den Monaten Mai - Juli, beitragen. Gleiches gilt für nicht landwirtschaftliche genutzte Grünflächen, da kein Bedarf an optimaler Futterqualität vorliegt. Bei den AUM Maßnahmen gibt es allerdings deutliche Unterschiede in Bezug auf die Anzahl der Blühtage vor einem Schnitt (Abb. 5.7 rechts).

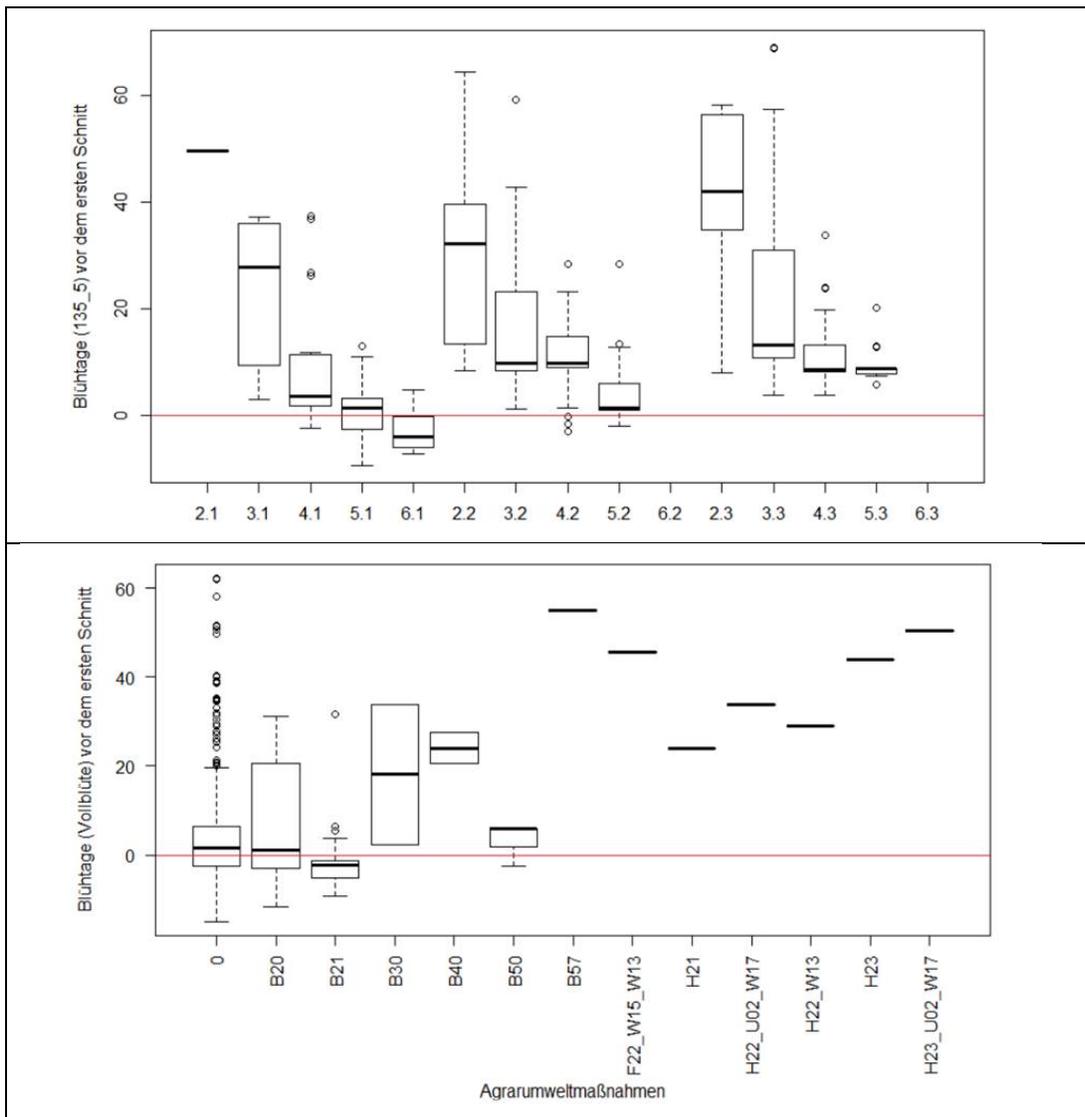


Abb. 5.7: Oben: Blühtage von Wiesenfuchsschwanz in den drei Testgebieten in Abhängigkeit von der Schnitffrequenz (2.1=Testgebiet 1, 2 Schnitte). Unten: Potenzielle Blühdauer von Wiesenfuchsschwanz in den Testgebieten ohne („0“) sowie mit verschiedenen Agrarumweltmaßnahmen (AUM) (B20 - Extensive Grünlandnutzung für Raufutterfresser, maximaler Viehbesatz von 1,40 GV/HFF im gesamten Betrieb; B21 – Extensive Grünlandnutzung für Raufutterfresser; Maximaler Viehbesatz von 1,76 GV/ha HFF im gesamten Betrieb; B22, B23 – Extensive Grünlandnutzung auf Almen

und Alpen; B30 – Extensive Grünlandnutzung entlang von Gewässern und in sonstigen sensiblen Gebieten; B40 – Erhalt artenreicher Grünlandbestände; B50 – Heumilch - Extensive Futtergewinnung; B57 – Streuobst; 21 – Extensive Mähnutzung; Schnittzeitpunkt ab 01.06.; H22, F22 – Extensive Mähnutzung; Schnittzeitpunkt ab 15.06. • H23, F23 – Extensive Mähnutzung; Schnittzeitpunkt ab 01.07. • H24, F24 – Extensive Mähnutzung; Schnittzeitpunkt ab 01.08. • H25, F25 – Extensive Mähnutzung; Schnittzeitpunkt ab 01.09. • W13 – Naturschutzfachlich erforderlicher Zusatzschnitt • W14 – Verpflichtender Erhalt von ganzjährigen Altgrasstreifen / -flächen auf 5 bis 20% der Fläche • W15 – Feuchtezuschlag auf Feucht-, Nass- und Streuwiesen • W17 – Bewirtschaftungsruhe ab 15.3. bzw. 1.4. bis zum vereinbarten Schnittzeitpunkt • U02 – Vorweide der Fläche bis Ende April verboten).

Aus den Ergebnissen für die bayernweite Studie zu Landnutzung und Gräserpollen (M12, Anhang 11.5) geht hervor, dass die Pollenkonzentration spezifiziert als API und PP zwischen den Standorten sehr unterschiedlich war. Die Korrelationsanalyse zeigt, dass der Zusammenhang zwischen Landnutzung und Pollenkonzentration in der näheren Umgebung der Pollenfalle bis zu einer Distanz von 10 km am höchsten ist, und danach zunehmend abfällt (Abb. 5.8). API und PP weisen gerade bei geringen Entfernungen eine hohe Übereinstimmung auf. Es konnte gezeigt werden, dass sich die Gewichtung anhand von Nutzungsintensität und Windrichtung besonders gut für die Untersuchung von lokalen Graslandflächen und deren Beitrag zur Graspollenkonzentration eignet. Dennoch gibt es einen gewissen Anteil an Varianz, der sich nicht mit dem Graslandanteil erklären lässt. Dieser kann auf den Einfluss von kleinräumigen Gegebenheiten oder den Transport von Pollen über sehr weite Strecken zurückgeführt werden. Nachfolgende Studien könnten anhand von Daten zur Blüte und der Verteilung von Grasflächen eine Karte für Pollenallergiker erstellen.

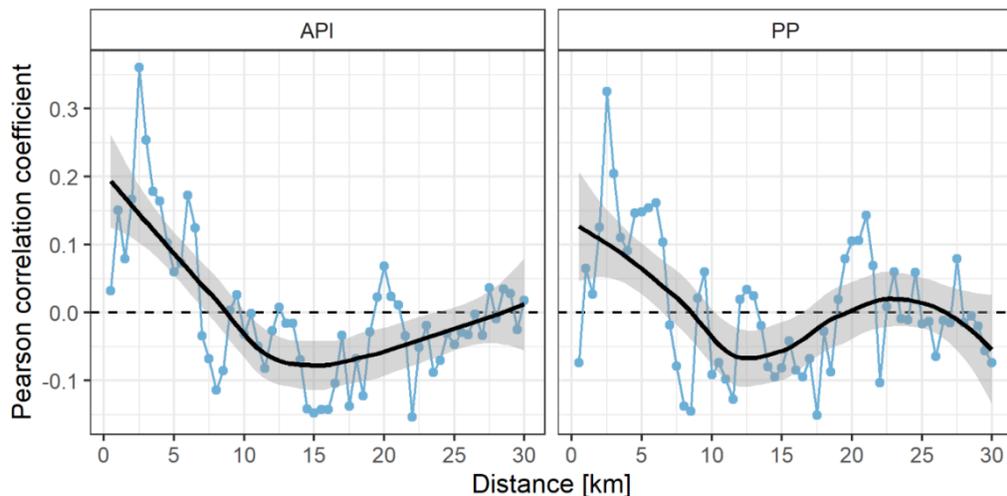


Abb. 5.8: Zusammenhang zwischen Landnutzung und Pollenkonzentration für API (links: aufsummierte tägliche Pollenkonzentrationen während der Hauptpollensaison) und PP (rechts: maximal gemessene tägliche Pollenkonzentration während der Hauptpollensaison) in Abhängigkeit von der Distanz von der Pollenstation und unter Berücksichtigung von Nutzungsintensität und Windrichtung.

5.4 Zweigmethode für Untersuchungen von Polleneigenschaften

Um die Polleneigenschaften wie die Allergenität zu untersuchen, benötigt man entsprechendes Pflanzenmaterial. Die Bestimmung der Polleneigenschaften erfordert eine In-situ-Sammlung von Pollen und eine anschließende Laboranalyse, die idealerweise mit manipulativen Klimaänderungsexperimenten kombiniert werden sollte. Für die Laboranalyse werden etablierte Standardmethoden wie ELISA und Western Blot zur Bestimmung des Allergengehalts verwendet.

Die notwendige In-situ-Sammlung von Pollen ist oft mit Schwierigkeiten verbunden, da der Pollen direkt nach der Emission unter geeigneten Bedingungen gelagert werden muss. Daher erfordert die Pollensammlung z. B. luftdurchlässige Beutel, die den Pollen sammeln und gleichzeitig vor Regen und Insekten schützen, während die Bildung von Kondenswasser verhindert werden muss. Die üblicherweise verwendeten Papiertüten bieten zwar Luftdurchlässigkeit, erfüllen aber die anderen Anforderungen nicht.

Durch die Zweigmethode in Klimakammern können diese Anforderungen berücksichtigt werden und gleichzeitig Variationen in den Umweltbedingungen simuliert werden. Das bedeutet, dass man verschiedene Klimaszenarien und deren Auswirkungen auf die Pollencharakteristika untersuchen könnte. Die Zweigmethode in Klimakammern hat sich in verschiedenen Versuchsaufbauten als ebenbürtiger Ersatz für Manipulationen im Freiland erwiesen (z.B. [30, 73]). In dieser Studie sollte nun herausgefunden werden, ob bzw. wie diese Methode für die Untersuchung von allergenen Pollen von Baumarten (Hasel, Erle und Birke) etabliert und damit auch in der Pollenforschung angewendet werden kann.

Die Studie „*Establishing the twig method for investigations on pollen characteristics of allergenic tree species*“ von Stephan Jung, Feng Zhao und, Annette Menzel wurde bei der internationalen, begutachteten Zeitschrift „*International Journal of Biometeorology*“ veröffentlicht [74]. Sie ist im Kapitel 11.3 Publikationen zu finden.

5.4.1 Methode

Im Winter 2018/19 wurden von den weit verbreiteten Strauch- bzw. Baumarten Hasel, Erle und Birke jeweils 3-4 Individuen ausgewählt. Bis zu vier Wochen vor der Blüte im Freiland wurden in einwöchigen Abständen Zweige von den ausgewählten Exemplaren geerntet und in Fläschchen mit Substrat in der Klimakammer bis zur Blüte aufbewahrt (Abb. 5.94). Vor der Blüte in der Klimakammer wurden die Zweige mit luftdurchlässigen Tüten versehen, um den reifen Pollen auffangen zu können. Aufgrund von technischen Problemen stand für den Versuch letztendlich nur eine Klimakammer zur Verfügung. Diese lief unter einer 15 Stunden Tag (20 °C) und 9 Stunden Nacht (15 °C) Abfolge, um die Blüte und Pollenfreisetzung zu ermöglichen. Zur Sicherheit bei möglichen weiteren technischen Ausfällen wurde ein zweiter Satz Zweige bei Innenraumbedingungen in Fensternähe aufbewahrt und ebenfalls beprobt (Abb. 5.94). Aus vorangegangenen Experimenten war bekannt, dass das verwendete Substrat möglicherweise einen Einfluss auf die Blüte und Pollenentwicklung hat. In ersten Testreihen zu Hasel wurden Gewebekulturdünger, Pflanzendünger und normales Wasser als Substrat verwendet. Zwischen den Substraten zeigten sich keine nennenswerten Unterschiede, deshalb wurden bei Erle und Birke nur die Substrate Gewebekulturdünger und Wasser verwendet. Allen Substraten wurde ein Fungizid gegen Pilzwachstum beigelegt.



Abb. 5.9: Zweige mit luftdurchlässigen Tüten zur Pollensammlung, Links: Innenraum, Mitte: Klimakammer und Rechts: Vergleich von abgeschnittenen und nicht abgeschnittenen Zweigen im Freiland.

Der mögliche Einfluss des Abtrennens des Zweigabschnitts von der Pflanze wurde in einem direkten Vergleich zwischen abgeschnittenen und nicht abgeschnittenen Zweigen unter Freilandbedingungen untersucht. Einzelne Zweige wurden abgeschnitten und mit einem künstlichen Substrat versehen und in ihrer ursprünglichen Position mit Draht wieder befestigt. Die gleiche Anzahl von Zweigen wurde als Kontrolle ausgewählt und am Baum belassen (Abb. 5.9). Wie in der Klimakammer wurden die Zweige vor der Blüte mit Tüten zum Auffangen der Pollen versehen.

Während des Versuchszeitraums wurden die Wachstumsstadien der Kätzchen draußen und in der Klimakammer anhand des BBCH Schlüssels in wöchentlichen Abständen aufgenommen. Die Temperatur und Luftfeuchtigkeit wurden mit Hobo Loggern in Höhe der entnommenen Zweige und in der Klimakammer bzw. im Innenraum kontinuierlich gemessen.

Nach Blühende wurden die Pollen von den Staubbeutel getrennt und anschließend abgewogen. Es wurde das durchschnittlich emittierte Pollengewicht pro Kätzchen und die durchschnittliche Kätzchenlänge für jeden Zweig gemessen. Die abgewogenen Pollen wurden bei -20°C gelagert. Die Bestimmung des Durchschnittsgewichts pro Pollenkorn erfolgte unter Einwaage von 5 mg Pollen, welche dann mit Hilfe eines Cell Counters (Biorad tc10) gezählt wurden. Für die Analysen im Labor wurde der Pollen zunächst extrahiert. Hierzu wurden 10 mg Pollen in einer Pufferlösung für mehrere Stunden geschüttelt, anschließend zentrifugiert und der Überstand entnommen. Aus dem so entstandenen Extrakt wurde unter Verwendung des Bradford Verfahrens der Proteingehalt bestimmt [75]. Für die Bestimmung des Allergengehalts standen die Verfahren Dot Blot und Western Blot zur Verfügung. Während beim Dot-Blot die Gesamtheit aller Allergene detektiert werden kann, können beim 1D Western Blot einzelne Allergene unterschieden werden. Für die vorliegende Studie wurde der Western Blot gewählt (Abb. 5.10). Die gewonnenen Allergengehalte wurden in Bezug zum Gesamtproteingehalt gesetzt. Corona-bedingt kam es bei den Laborarbeiten zu erheblichen Verzögerungen. Diese konnten im Nachgang abgeschlossen werden, allerdings musste dieser Zeitraum durch Lehrstuhlmittel finanziert werden, da ein Aufstockungsantrag abgelehnt wurde. Alle Laboranalysen wurden in Zusammenarbeit mit Teilprojekt 3 durchgeführt (M18, Anhang 11.2).

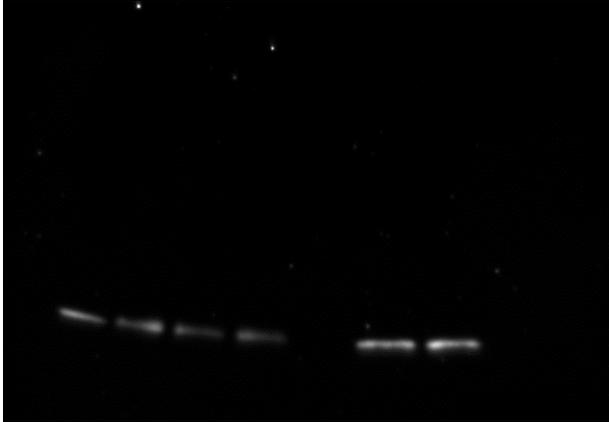


Abb. 5.10: Western Blot - Chemilumineszenz Messung für sechs Erlenpollenproben. Gut zu sehen sind die starken Banden bei dem Allergen Aln g 1 (*Alnus glutinosa* Hauptallergen) einem Homolog zu Bet v1, welches auch in Hasel und Birke vorkommt).

5.4.2 Ergebnisse

Die Zweigmethode in Klimakammern konnte erfolgreich für Blüh- und Pollenuntersuchungen etabliert werden (M13, Anhang 11.2). Bei dem Vergleich zwischen abgeschnittenen und nicht abgeschnittenen Zweigen unter Freilandbedingungen konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Die abgeschnittenen Zweige von Hasel, Erle und Birke haben in der Klimakammer und unter Raumbedingungen geblüht und ausreichend Pollen für weiterführende Laboruntersuchungen produziert und emittiert. Zwischen den verwendeten Substraten Gewebekulturdünger, Pflanzendünger und normalem Wasser gab es keine signifikanten Unterschiede, womit ein Einfluss des Substrats auf das Blühverhalten und die Pollenproduktion ausgeschlossen werden konnte. Die Ernte der Zweige in einwöchigen Abständen vor der natürlichen Blüte mit anschließender Verwahrung in der Klimakammer bzw. unter Innenraumbedingungen hat gezeigt, dass die Blüte im Vergleich zum Freiland in der Klimakammer deutlich frühzeitiger stattfand. Hasel blühte in der Klimakammer 69 Tage früher, Erle 35 Tage und Birke 15 Tage als im Freiland. Bei späterer Ernte stiegen die Pollenproduktion pro Kätzchen sowie die Kätzchenlänge und der Proteingehalt. In Abbildung 5.11 sind die Ergebnisse der Analysen für die Birke dargestellt. Diese Studie zeigt, dass Zweigexperimente als Proxy für aufwendige Experimente im Freiland in zukünftigen Studien verwendet werden können.

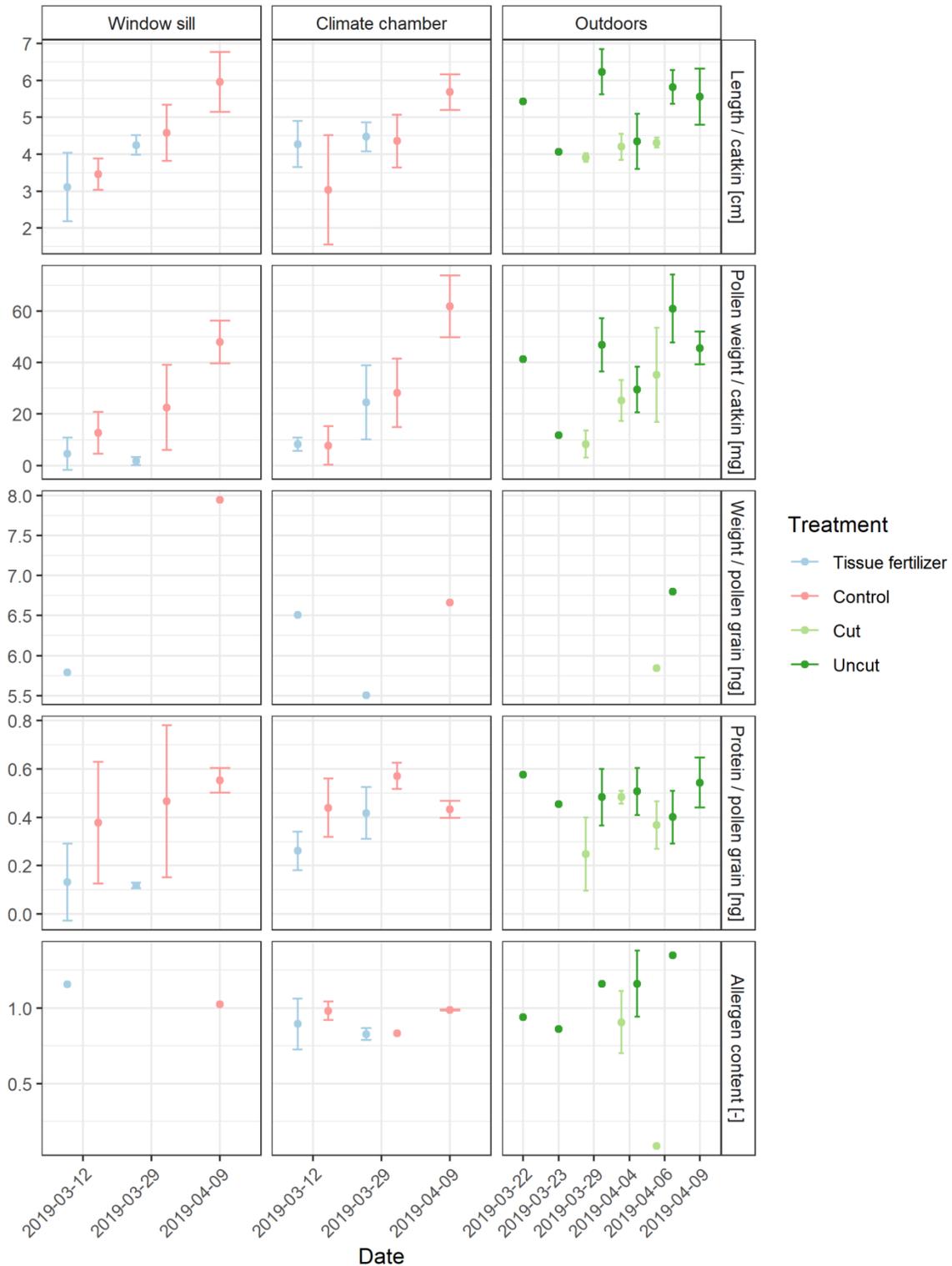


Abb. 5.11: Ergebnisse der Laboranalyse für Birke: Länge pro Kätzchen (cm), Gewicht pro Pollenkorn (ng), Proteingehalt pro Pollenkorn (ng) und Allergehalt für die jeweiligen Blühstandorte Fensterbank, Klimakammer und Freiland unter den Behandlungen Gewebekulturdünger, Kontrolle, geschnittene (cut) und nicht abgeschnittene Zweige unter Außenbedingungen (uncut) für verschiedene Erntetermine, Balken stellen die Standardabweichung entsprechend dem Stichprobenumfang dar.

6 Einfluss des Klimawandels auf die Allergenität von Pollen (Teilprojekt 3)

Klimawandelbedingungen beeinflussen nicht nur die Menge an Pollen, sondern auch deren Eigenschaften. Daher war es Ziel des Teilprojekts 3, Pollen aus kontrollierten, Klimaversuchen zu gewinnen und die allergenen Eigenschaften dieser Pollenproben genauer zu untersuchen. Als Modellpflanzen wurden Birke und *Ambrosia* unter folgenden Fragestellungen untersucht.

- (1) Welchen Einfluss hat erhöhte Temperatur auf die Allergenität der Pollen von Birke und *Ambrosia*?
- (2) Wie verändern Stickoxide unter verschiedenen Temperaturszenarien die Allergenität von *Ambrosia*?
- (3) Beeinflussen künftige Bedingungen die Allergenität von Pollen regional unterschiedlich am Beispiel der Regionen im Raum München und Würzburg?

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse für Birke und *Ambrosia* dargestellt anhand von Ergebnissen zur Blühphänologie und der Polleneigenschaften, die anhand biochemischer Methoden charakterisiert wurden.

6.1 Material und Methoden

6.1.1 Experimente mit allergenen Pflanzen

6.1.1.1 Gewächshausexperimente mit Birken 2019 und 2020: Einfluss früherer Blühzeitpunkte (M14.1-3, Anhang 11.2)

Für die Experimente zur Allergenität von Birkenpollen unter erhöhten Frühjahrstemperaturen wurden jungblühende, klonale Birken verwendet. Diese bieten den Vorteil, genetisch einheitlich zu sein (Stecklinge einer Pflanze) und in normal dimensionierten Gewächshauskabine als Versuchspflanzen zur Blüte zu kommen. Die Pflanzen wuchsen bis zum Versuchsstart in 21 cm Rundtöpfen mit 3 l Standarderde im Freiland leicht beschattet unter einer Pergola. Für die Versuche 2019 und 2020 wurden unter ca. 180 vorhandenen Pflanzen diejenigen ausgewählt, die im Vorjahr Kätzchen ausgebildet hatten. 2019 wurden N=74 Pflanzen verwendet. Davon wurden 37 Pflanzen am 14.02.2019 noch vor Einsetzen der Vegetationsperiode vom Freiland ins Gewächshaus in eine unbeheizte, belüftungsfähige Gewächshauskabine transferiert, die künftig erhöhte Frühjahrsbedingungen simulieren sollte, und 37 Pflanzen verblieben im Freiland unter den zu der Zeit herrschenden Außenbedingungen. Licht, Temperatur und Luftfeuchte wurden im Freiland und Gewächshaus kontinuierlich aufgezeichnet (Abb. 6.1 A, B). Die Lichtverhältnisse waren an beiden Standorten (Pergola/Gewächshaus) vergleichbar. Blühphänologische Daten wurden in regelmäßigen Abständen standardisiert erhoben nach BBCH-Code der Biologischen Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische Industrie [76]. Pollen wurde in kleinen Pergamenttütchen, die über die Kätzchen gestülpt waren, gesammelt, in Reaktionsgefäße überführt und bis zur weiteren Verwendung bei -80°C gelagert. Nach der Pollenernte wurden die Gewächshauspflanzen wieder unter die Pergola ins Freiland gebracht. Nur ein Teil der im Frühjahr 2019 verwendeten Versuchsbäume bildeten im Sommer 2019 Kätzchen (15 der 37

Gewächshausbäume und 20 der 37 Freilandbäume). Die nicht-blühenden Bäume wurden entsprechend ersetzt durch „Ersatz“-Bäume, die unter Freilandbedingungen gewachsen waren und Kätzchen gebildet hatten. („GH2020“ & „FL2020“). Wegen der geringen Anzahl an Kätzchen pro Baum wurden mehr Pflanzen verwendet (N=112). 56 Pflanzen wurden am 04.02.2020 ins Gewächshaus gestellt, 56 verblieben im Freiland. Es wurde dafür Sorge getragen, dass die Bäume fürs Gewächshaus (229) und Freiland (236) eine vergleichbare Menge an Kätzchen aufwiesen. Der Versuchsverlauf entsprach ansonsten demjenigen von 2019.

Relative Temperaturunterschiede zwischen dem Freiland und einer belüfteten, unbeheizten, aber von der Sonne tagsüber erwärmten Gewächshauskabine wurden in zwei unterschiedlichen Frühjahren genutzt, um erhöhte Frühjahrstemperaturen zu simulieren. Da sich die Gewächshausatemperatur nicht unter die Außentemperaturen kühlen ließ, erwies es sich als nicht durchführbar, kontrollierte Temperaturszenarien von ca. +4 °C nach RCP 8.5 einzustellen. Die Temperaturen im Gewächshaus waren mit $8,8 \pm 3,2$ °C (2019) bzw. $8,7 \pm 4,9$ °C (2020) durchschnittlich höher als im Mittel unter RCP 8.5 (über 4,6 °C) relativ zu den derzeitigen Temperaturen am Nordrand Münchens zu erwarten wäre, sind aber in sehr warmen Frühjahren besonders in wärmeren Regionen Bayerns denkbar. Die sich einstellenden Bedingungen im Jahr 2019 wurden als Szenario 1 (lt. Antrag) genutzt, die sich einstellenden Bedingungen 2020 wurden als Szenario 2 (lt. Antrag) verwendet.

6.1.1.2 Phytotronexperimente mit Traubenkraut/*Ambrosia* 2018 und 2019: Einfluss von Erwärmung und erhöhten Stickoxidkonzentrationen (M16.1, M16.2, Anhang 11.2)

In zwei unabhängigen Versuchsläufen wurden derzeitige und künftige Temperaturbedingungen für die Regionen München (Versuchslauf 2018) bzw. Würzburg (Versuchslauf 2019, mit der Annahme einer um 1,5 °C höheren Durchschnittstemperatur in Würzburg gegenüber München) in den Phytotronen des Helmholtz Zentrums München simuliert. In jeder Phytotronkammer lassen sich für Temperatur, Luftfeuchte und Lichtbedingungen genaue Verläufe programmieren. In jeder Phytotronkammer befinden sich für jeden Versuchslauf standen 2 Phytotronkammern zur Verfügung, von denen eine Kammer unter den jeweils niedrigeren Temperaturen (basierend auf einem 10-Jahresmittelwert und Modellierungen in TP2) und die zweite Kammer unter künftig erhöhten Temperaturen (Annahme + 4°C in beiden Regionen, abgeschätzt nach RCP 8.5 in Absprache mit den Partnern im Projekt) betrieben wurde. Von den 4 Unterkammern pro Phytotronkammer, wurden in jedem Versuchslauf zwei Unterkammern mit gereinigter Außenluft und zwei mit erhöhter Stickstoffdioxidkonzentration (NO₂ +80 ppb) betrieben (Tab. 6.1). Die Programmierung der Kammerbedingungen, Planung und Betreuung der Versuche (*Extern M8, Anhang 11.2*) erfolgte durch die Gruppe experimentelle Umweltsimulation, Prof. Schnitzler am Helmholtz Zentrum München.

Die Aufzucht von *Ambrosia artemisiifolia* L.-Pflanzen erfolgte aus Samen auf Standarderde. Die Keimlinge wurden in 17 cm Rundtöpfe gepflanzt und 4 Wochen zur Gewöhnung unter einheitlichen Bedingungen in den Phytotronkammern gehalten, bevor die oben beschriebenen Bedingungen in den Phytotronkammern bis zur Pollenernte galten. Die Pflanzen wurden bis zur Pollenernte mindestens 4 mal wöchentlich bezüglich des Wachstums und der Blühphänologie bonitiert. Da das Wachstum von *Ambrosia* zwischen Individuen sehr stark unterschiedlich ist, mussten zu große Pflanzen zurückgeschnitten werden, sodass keine quantitativen Aussagen zu

Biomasseproduktion oder absoluten Pollenmengen aus diesen Versuchen möglich sind. Daher wurden die Eigenschaften der geernteten Pollen jeweils zwischen den einzelnen Behandlungen qualitativ verglichen. Die Pollenernte erfolgte ab dem Zeitpunkt, an dem 80% der männlichen Blüten Pollen freisetzen wie in Kanter et al. beschrieben. Die Pollen wurden bis zur weiteren Analyse bei -80°C aufbewahrt [33].

Tabelle 6.1: In den Phytotronversuchen mit *Ambrosia* verwendete Szenarien und entsprechende Abkürzungen ausgehend von aktuellen Temperaturen in der Region München [33]. Entsprechend der anzunehmenden Temperaturerhöhungen unter verschiedenen RCPs für 2100 (RCP2.6 unter 2 °C, RCP 4.5 über 2,6 °C, RCP 8.5 4,8 °C), ergaben sich die weiteren Temperaturszenarien, wobei Abweichungen aus praktischen Gründen bei der Versuchsdurchführung in Kauf genommen werden mussten. Um Auswirkungen künftiger Szenarien für zwei bereits heute unterschiedlich warme Regionen in Bayern zu vergleichen wurden die Szenarien entsprechend der Regionen benannt. Außerdem wurden ideale Luftbedingungen (ohne Stickoxide, NO₂) in der Kammerluft simuliert, im Vergleich zu hohen NO₂-Konzentrationen (80 ppb), wie sie derzeit an stark befahrenen Straßen auftreten können.

Temperaturszenarien	Szenarien* München	Szenarien* Würzburg	Bezeichnung (ohne NO ₂)	Bezeichnung (mit 80 ppb NO ₂)
München heute	+0 °C	-	T _M	T _M N
Würzburg heute (≈RCP2.6 München)	+1,5 °C	+0 °C	T _W	T _W N
RCP8.5 München (≈RCP4.5 Würzburg)	+4 °C	+2.5 °C	T _M 4	T _M 4N
RCP8.5 Würzburg	+5,5 °C	+4°C	T _W 4	T _W 4N

6.1.2 Molekularbiologische und biochemische Analyse des allergenen Potentials

Verschiedene Parameter, die in Zusammenhang mit der Allergenität stehen, wurden anhand der Pollenproben aus den Versuchen mit *Ambrosia* und Birke bestimmt. Die Pollenproben von *Ambrosia* stammen aus den Phytotronversuchen (Tab. 6.1). Die Pollenproben von Birken stammen aus dem Erwärmungsexperiment mit getopften, klonalen Birkenpflanzen, die im Freiland bzw. Gewächshaus zur Blüte gebracht wurden (6.1.1.1). Die Aufarbeitung der Pollen erfolgte unabhängig von der Pflanzenart wie im Folgenden beschrieben.

Die Extraktion der Pollenproteine aus Pollenkörnern (100 mg/ml) erfolgte in wässriger Pufferlösung [33, 77]. Die Proteinkonzentration wurde mit dem Bradford-Assay [75] bestimmt. Das allergene Potential der Pollenproteine wurde wie folgt weiter analysiert.

Der Nachweis reaktiver Sauerstoffspezies (ROS) als Indikator für oxidativen Stress erfolgte über den NBT-Assay (Nitroblau-Tetrazolium-Assay) [78, 79]. Reaktive Sauerstoffspezies, die z.B. durch die NADP(H)-Oxidase-Aktivität in Pollen erzeugt werden, tragen zu allergischen Entzündungsreaktionen bei.

Um die potentielle Allergenität der Proteinextrakte zu bestimmen, wurden Dot-Blot-Analysen durchgeführt. Diese beruhen auf dem Nachweis der Reaktion von Antikörpern mit entsprechenden Proteinen, in unserem Fall allergenen Proteinen aus Pollen von Birke bzw. *Ambrosia* gegenüber Seren von Patienten, die gegen die entsprechenden Pollenproteine

allergisch reagierten. Für immunologische Nachweise der Antikörperreaktion gegen Birken- bzw. *Ambrosia*allergene wurden jeweils Seren von 29 Patienten mit entsprechender Allergie der Immuno CAP®-Klassen > 2 vereint und dienten jeweils als primäre Antikörper. Für die genauere Identifizierung der für die jeweilige Reaktion verantwortlichen Proteine, erfolgte eine Auftrennung, entweder der Größe nach mit eindimensionaler oder der Größe und Ladung nach mit zweidimensionaler Gelelektrophorese [80]. Die aufgetrennten Proteine wurden anschließend auf eine Nitrocellulosemembran transferiert. Die Membranen wurden für den Proteinnachweis in Ponceau-Rot-Lösung gefärbt und für den Nachweis der Allergenproteine mit Seren inkubiert, und über weitere Antikörperreaktionen detektiert [22]. Die durch die Seren/Antikörper erkannten Proteine wurden durch Chemilumineszenz visualisiert, die Intensität der Reaktion wurde mittels Bildanalyse (Image J 1.47 (Open Source) analysiert und als integrierte optische Dichte (IOD) ausgewertet.

Die Bestimmung des Gehalts der Hauptallergene der Birke (Bet v 1) bzw. *Ambrosia* (Amb a 1) wurde zusätzlich mit ELISA (Enzyme-Linked ImmunoSorbent Assay) wie in Buters et al. [77] beschrieben für Birke von TP1 durchgeführt. Für der Amb a 1 wurde der ELISA Kit von Indoor biotechnologies (EL-AM1) mit Tetramethylbenzidin als Substrat auf einer 384-Well-Platte verwendet.

Anstelle der im Antrag genannten 2D-DIGE-Methode wurden zum Vergleich der Pollenproteome massenspektrometrische Analyse (MALDI-TOF) durchgeführt, die die besser auflösende State of the Art-Methode darstellt. Anhand von gereinigten Pollenproteinextrakten wurde das gesamte Pollenproteom in der Proteinfacility des Helmholtzzentrums München mit der markierungsfreien Protein Quantifizierungsmethode massenspektrometrisch analysiert [81]. Als Ergebnis dieser Analysen lassen sich quantitative (Mengen) und qualitative (Art der Proteine) Aussagen treffen, letztere basierend auf Vergleichen homologer Aminosäuresequenzen in Proteindatenbanken. Dies ermöglichte eine vergleichende, quantitative Analyse aller identifizierter Proteine in den Proben aus verschiedenen Behandlungen und - für den Zweck der aktuellen Studie - insbesondere der Allergenproteine. Dabei wurde statistisch getestet, ob die entsprechenden Allergenproteine unter den Versuchsbedingungen zu- oder abnahmen im Vergleich zu den Kontrollbedingungen.

Als weiterer Faktor wurde untersucht, ob Flavonoide in Pollen potentiell die Allergenität verändern können. Die Flavonoidgehalte in Pollenextrakten wurde anhand eines kolorimetrischen Tests mit dem Flavonoid Quercetin als Standard bestimmt [82]. Für die statistische Analyse wurde eine One-Way ANOVA mit Post-hoc-Test (HSD-Tukey) verwendet und als Signifikanzniveau ein p-Wert von $\leq 0,05$ festgelegt.

6.2 Ergebnisse

6.2.1 Einfluss von erhöhten Temperaturen im Frühjahr auf die Blühphänologie sowie das allergene Potential von Birke

Bei klonalen Birken wurde untersucht, wie sich die Erhöhung von Frühjahrstemperaturen, wie sie unter pessimistischen Annahmen (RCP8.5) in extremen Jahren künftig eintreten könnten

(M14.2, M14.3, Anhang 11.2) auf die Allergenität von Birkenpollen auswirkt. Dazu wurden in zwei aufeinanderfolgenden Jahren (2019, 2020) höhere Frühjahrstemperaturen simuliert, indem ein Kollektiv von Birken im Februar aus dem Freiland ins Gewächshaus verbracht wurde, während jeweils ein vergleichbares Kollektiv im Freiland verblieb. Bis zum Blühzeitpunkt der Birken im Gewächshaus waren die Tagesmitteltemperaturen im Gewächshaus gegenüber dem Freiland um $8,8 \pm 3,2$ °C im Jahr 2019 bzw. $8,7 \pm 4,9$ °C im Jahr 2020 erhöht (Abb. 6.1). Die Temperaturerhöhung in den Birkenexperimenten lag somit höher als unter der Annahme RCP 8.5 im Jahr 2070 im Mittel zu erwarten wäre. Wir betrachten entsprechend den erzielten Temperaturunterschied als mögliches Extremszenario zwischen einer gemäßigten und einer warmen Region in Extremjahren. Eine präzisere Temperatureinstellung im Gewächshaus war nicht möglich, da neben den Außentemperaturen auch die Sonneneinstrahlung im Gewächshaus eine Rolle spielte bei der Temperaturentwicklung, und hier nicht zusätzlich gekühlt werden konnte.

Es dauerte im Mittel 20 Tage (2019), bzw. 19 Tage (2020), bis die Birken nach dem Transfer ins Gewächshaus zu blühen begannen, während die im Freiland verbliebenen Birken in beiden Jahren 38 Tage später blühten. Die Pollensaison der Birken 2019 im Gewächshaus dauerte $10,6$ ($\pm 3,6$) Tage, im Freiland $9,3$ (± 3) Tage (Abb. 6.1 C). Dieser Unterschied in der Blühdauer war statistisch nicht signifikant.

Im Vergleich zwischen 2019 (Blühbeginn Freiland am 12.4.) war der Blühbeginn der Freilandbirken 12 Tage eher (01.04.2020). Die Blühdauer war vergleichbar zwischen Gewächshausbäumen und Bäumen aus dem Freiland und im Mittel mit 8,7 Tagen etwas kürzer als 2019 (M14.1, M14.2, Anhang 11.2).

Da die klonalen Birken in beiden Jahren nur sehr wenige Kätzchen aufwiesen, waren die gewonnenen Pollenmenge (M14.1, Anhang 11.2) entsprechend gering (Abb. 6.2). Gewächshausbirken, die 2019 und 2020 im Gewächshaus waren zeigten einen um ca. 3 Tage verzögerten Blühstart (Abb. 6.1 C) und wiesen signifikant weniger Kätzchen mit geringeren Pollenmengen und somit weniger Pollen pro Baum auf als Bäume, die 2020 erstmals ins Gewächshaus gekommen waren (Abb. 6.2 B).

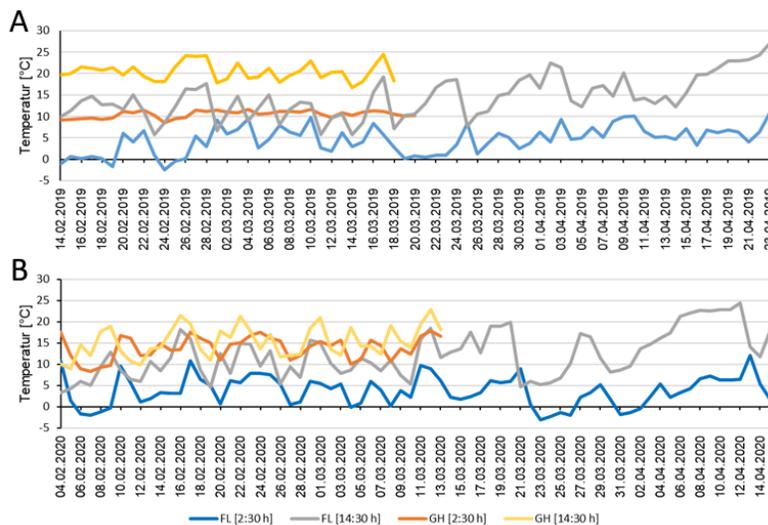
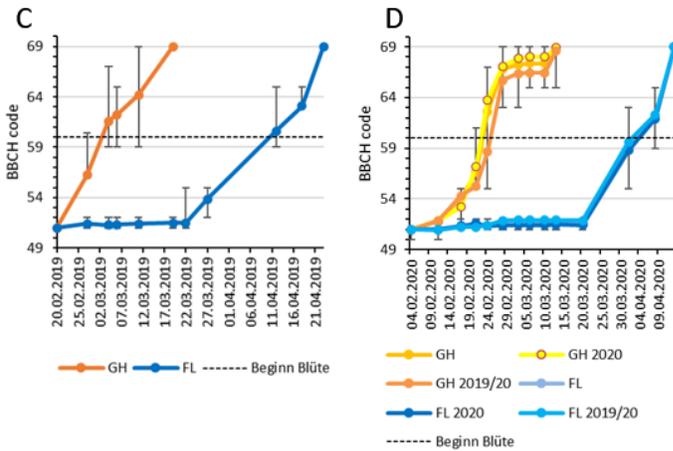


Abb. 6.1: Temperaturverlauf während des Versuchs mit klonalen Birken bis zur Pollenernte im Gewächshaus (GH) und Freiland (FL) jeweils 2:30 h nachts und 14:30 h tags. A) 2019, und B) 2020. C) Blühphänologie der Birken 2019 und D) 2020, jeweils nach BBCH-Code der Biologischen Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische Industrie [76] für Birkenkätzchen; Code 51: Einsetzen des Wachstumsvorgangs: erste grüne Stellen werden an den Kätzchen sichtbar, jedoch unbedeutende Streckung; 55: an den grünen, gestreckten Kätzchen sind starke Dehnungsrisse sichtbar, braune Deckschuppen lösen sich; 60: Beginn der Blüte; 69: Ende der Blüte, Kätzchen stäuben nicht mehr.



Fehlerbalken zeigen die Bandbreite der phänologischen Stadien eines Zeitpunkts an. Abkürzungen: GH = alle Birken im Gewächshaus; GH 2019/20 = Birken, die 2019 und 2020 im Gewächshausversuch waren; GH 2020 = Birken, die 2020 neu in den Gewächshausversuch kamen. Dies gilt entsprechend für das Freiland (FL), FL 2019/20 und FL 2020.

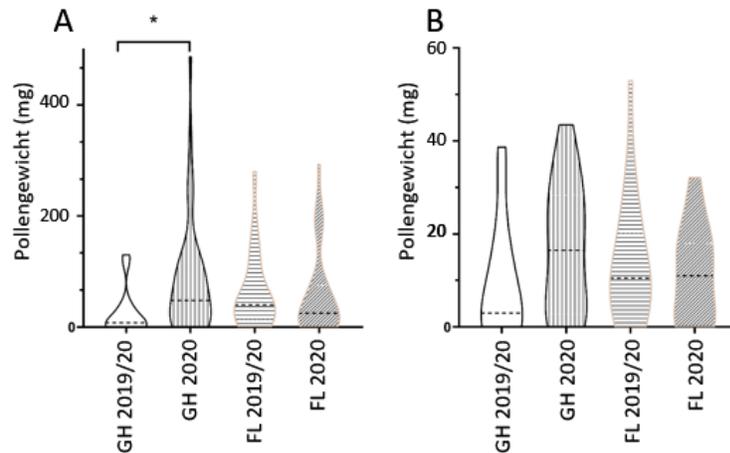


Abb. 6.2: Pollenmengen von klonalen Birken unter erhöhter Temperatur im Gewächshaus und unter Freilandbedingungen 2020 A) Pollenmenge pro Baum in mg. B) Pollenmenge pro Kätzchen in mg. Die gestrichelte Linie gibt den Median an. * = p-Wert $\leq 0,05$ (ANOVA); GH = Gewächshausversuch; FL = Freiland

6.2.2 Allergenes Potential von Birkenpollen unter erhöhten Frühjahrstemperaturen

Die beiden Versuchsjahre 2019 und 2020 resultierten in unterschiedlichen Ergebnissen in Hinblick auf die allergenen Potentiale von Birkenpollen (*M 15.1-3, Anhang 11.2*). Extrakte von Pollenproben aus dem Gewächshaus (GH) und Freiland (FL) 2019 reagierten nicht signifikant unterschiedlich im Immunoblot (Abb. 6.3 A). Im Versuchsjahr 2020 zeigten Pollenproben aus dem Gewächshaus (*M15.3, Anhang 11.2*), unabhängig davon, ob sie schon im Vorjahr im Gewächshaus waren, signifikant stärkere Interaktionen mit Patientenseren als Pollenproben aus dem Freiland (*M15.1, Anhang 11.2*). In beiden Versuchsjahren gab es keinen Hinweis auf erhöhten oxidativen Stress: weder NADP(H)-Oxidase Aktivität (Abb. 6.3 C) noch H₂O₂-Gehalt in Pollen zeigten signifikanten Unterschiede in Abhängigkeit von der Behandlung (GH oder FL) (Abb.6.3 D).

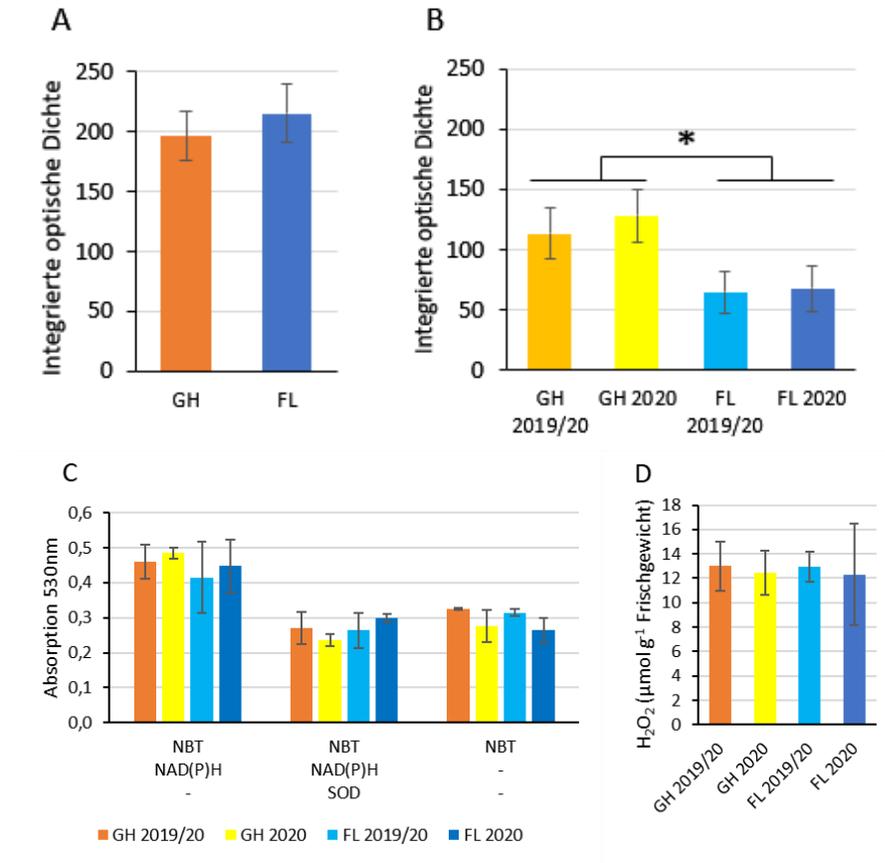


Abb. 6.3: Allergenes Potential von Birkenpollenproteinen basierend auf Immunoblots von Proben aus A) dem Versuchsjahr 2019 (n=5), B) dem Versuchsjahr 2020 (n=3). Dargestellt ist die Intensität der Nachweisreaktion als integrierte optische Dichte (IOD) basierend auf humanen Seren von Birkenpollen-sensibilisierten Patienten. Die integrierte optische Dichte ist ein relativer Wert, es liegen keine absoluten Werte vor. Daher sind A & B separat zu betrachten und nicht direkt vergleichbar. C: NAD(P)H-Oxidase Aktivität von Birkenpollen im Jahr 2020, identifiziert durch den NBT-Assay (n=3) D) H₂O₂-Konzentrationen in Birkenpollen (2020) n=3)

Mit der massenspektrometrischen Gesamtproteomanalyse konnten ca. 500 Proteine identifiziert werden. Insgesamt wurde nur eine geringe Anzahl an Proteinen durch erhöhte Temperatur im zeitigen Frühjahr verändert, wobei im Frühjahr 2019 mehr Pollenproteine unter erhöhter Temperatur signifikant erhöht waren als gehemmt. Im Jahr 2020 war unter erhöhter Temperatur ein größerer Anteil an Pollenproteinen gehemmt als aktiviert, und zwar unabhängig davon, ob die Bäume eine oder zwei Perioden im Gewächshaus durchlaufen hatten. Unter den in 2019 durch erhöhte Temperatur signifikant aktivierten Proteinen befanden sich Proteine des Zuckerstoffwechsels und der Glykolyse, sowie Proteine, die das Redox Potential der Zelle regulieren.

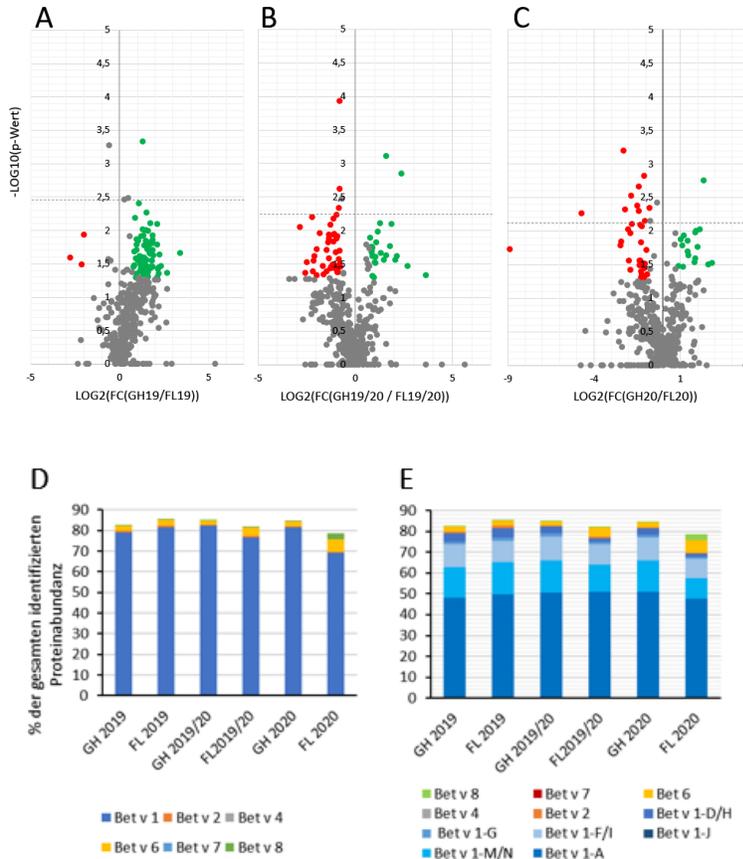


Abb 6.4: Signifikant regulierte Birkenpollenproteine aus den Versuchen mit Birken unter wärmeren Frühjahrstemperaturen (Gewächshausproben, GH) im Vergleich zu Freilandproben (FL). Proteine wurden über markierungsfreie Massenspektroskopie quantifiziert. Als Volcano-Plots dargestellt sind die Verhältnisse der Proteinhäufigkeiten zwischen GH und FL (GH/FL); A) Proben von 2019, B) Proben von 2020, bei denen die Birken 2019 und 2020 im Versuch waren, C) Proben von Birken, die nur 2020 im Versuch waren; rot - signifikant um den Faktor $\geq 1,7$ erniedrigt, grün – signifikant um den Faktor $\geq 1,7$ erhöht, grau nicht signifikante Werte. Die Achsenwerte sind logarithmisch dargestellt (x-Achse Verhältnisse der Proteinabundanz LOG_2 ; y-Achse p-Werte als $-\text{LOG}_{10}$). Die gestrichelten Linien geben das Signifikanzniveau nach Korrektur für die Falscherkennungsrate (false discovery rate FDR) an. D) Mengenanteil der Allergenproteine in % der gesamten identifizierten Proteine; E) wie D, zusätzlich differenziert nach Isoformen der Allergene (n=3 Proben aus jeweils 3-4 Pflanzen).

Die quantitative Analyse ergab einen hohen mengenmäßigen Anteil von Allergenen am identifizierten Pollen-Gesamtprotein (Abb. 6.4 D, E). In Übereinstimmung mit den Immunoblot-Ergebnissen waren die Birkenallergene 2019 nicht signifikant unterschiedlich zwischen Freiland und Gewächshaus. 2020 wurde für die Gewächshaus-Birken geringfügig mehr Gesamt-Allergen (1,07-fach), sowie mehr Bet v 1 detektiert (1,13-fach). Die Nebenallergene Bet v 2 (Profilin), Bet v 6 (Isoflavon Reduktase) sowie Bet v 7 (Cyclophilin) waren in den Proben der Gewächshaus-Birken im Verhältnis zu Freiland-Birken 2020 um mindestens den Faktor 2,4 reduziert. Bet v 8, eine Glutathion S Transferase, war in Birken, die 2020 neu in den Gewächshausversuch gekommen waren, signifikant schwächer exprimiert als in den Freilandbirken (Verhältnis $< -1,7$ -fach).

Der Bet v 1 Allergengehalt wurde zusätzlich mittels eines weiteren antikörperbasierten Nachweisverfahrens, dem Enzyme-linked Immunosorbent Assay (ELISA) in der Gruppe von Prof. Buters (TP1) quantifiziert (Abb. 6.5). Gewächshaus- und Freiland-Proben aus dem Jahr 2019 wiesen im ELISA keine signifikanten Unterschiede im Bet v 1 Allergengehalt auf. Das gleiche gilt für die Vergleiche GH2019/20 vs. FL2019/20 und GH2020 vs. FL2020. Für alle Proben zusammengenommen ergab sich im Versuchsjahr 2020 jedoch ein signifikanter Unterschied zwischen dem Bet v 1 Gehalt aus Gewächshaus-Birken und Freiland-Birken mit signifikant weniger Bet v 1 in den Proben des Jahres 2020 gegenüber 2019. Dies war auch der Fall im Vergleich der Gewächshausproben beider Jahre. Interessanterweise setzten die Pollen aus dem

Jahr 2020 insgesamt weniger Protein pro mg Pollen frei. Auch hier war der Unterschied zwischen GH- und FL-Birken unter Einbeziehung aller Bäume signifikant. Die reduzierte Freisetzung an Proteinen wiederum hat einen Einfluss auf den freigesetzten Allergengehalt.

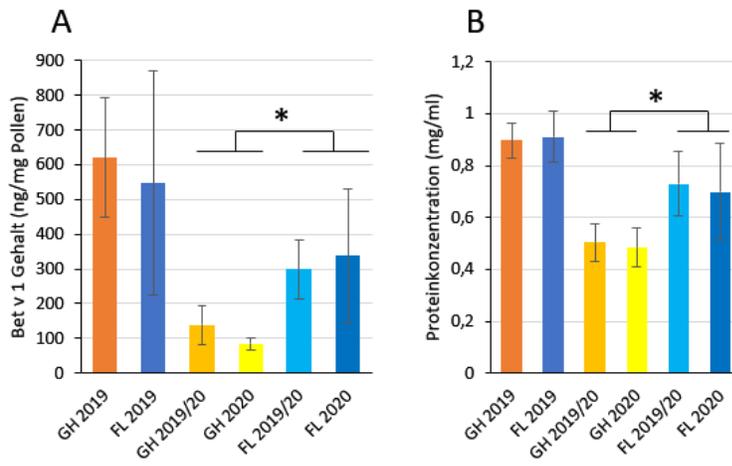


Abb. 6.5: Quantifizierung des Hauptallergens Bet v 1 aus Birke mittels ELISA. A) Bet v 1 Gehalte bezogen auf die Pollenmenge (mg), bestimmt mit Enzyme-linked Immunosorbent Assay (ELISA). B) Protein-konzentration von Pollenextrakten (100 mg/ml Pollen in Puffer). Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung an, n=3 Proben aus 3-4 Pflanzen, * signifikante Unterschiede (p-Wert $\leq 0,05$, T-Test)

Die Hypothese, dass sich erhöhte Temperatur im zeitigen Frühjahr auf die allergenen Eigenschaften von Birkenpollen auswirkt, ließ sich nur für das Jahr 2020 nicht aber für 2019 bestätigen. Weder Marker für oxidativen Stress (NAD(P)H-Oxidase-Aktivität, H_2O_2 -Gehalt) noch der Anteil an Allergenen am Gesamtproteom (massenspektrometrische Allergenquantifizierung von Bet v 1) waren signifikant verändert unter den Versuchsbedingungen (FL/GH oder zwischen den Jahren). Alternative Theorie: im Gewächshaus kommen die Pollen früher und optimaler. Im FL können je nach Wetter die Pollen später freigesetzt werden. In der Woche vor Freisetzung wird der Allergengehalt bestimmt. Schnelle Pollen sind schwach allergen, zurückgehaltene Pollen sind stärker allergen

Die auf immunologischen Methoden beruhenden Allergenitätsnachweise ergaben unterschiedliche Ergebnisse. Die Diskrepanz zwischen den Ergebnissen basierend auf Immunoblots bzw. ELISA beruht auf methodischen Unterschieden der Nachweise. Immunoblots gehen von gleichen *Proteinmengen* aus und detektieren mit Patientenseren, die außer dem Hauptallergen auch Nebenallergene und gegebenenfalls auch posttranslational modifizierte (PTM) Allergene erkennen. Diese möglichen Veränderungen der Allergene könnten wiederum einen Einfluss auf (i) die Reaktivität mit den Patientenseren [83, 84] und (ii) auf die Freisetzung der Proteine haben. Die ELISA Ergebnisse basieren wiederum auf gleichen *Pollenmengen* und spiegeln das freigesetzte Hauptallergen quantitativ wider. Ob das freigesetzte Bet v 1 aus Gewächshaus-Birken 2020 trotz geringer Menge mit Patientenseren reaktiver ist, ließe sich z.B. in ELISAs mit Patientenseren testen oder in Immunoblots mit gleichen Volumina an Pollenextrakt. Erste Immunoblots basierend auf gleichen Pollenmengen zeigten – entsprechend der Ergebnisse im ELISA -weniger Allergen in Pollen der Gewächshausbirken.

Die beobachteten Unterschiede der Allergenfreisetzung in den beiden Versuchsjahren bestätigen frühere Beobachtungen [77]. Birken, die im Vorjahr früher blühten (GH), bildeten im nächsten Jahr weniger Kätzchen mit einem geringeren Pollenertrag. Dies ist ein deutlicher Hinweis darauf, dass die Vorjahresbedingungen stärker in künftigen Untersuchungen

berücksichtigt werden sollten, da die Blüten unter den Vorjahresbedingungen angelegt werden. Inwieweit beispielsweise erhöhte Temperaturen und Trockenstress im Spätsommer/Frühherbst, also zu dem Zeitpunkt der Bildung der Kätzchen, einen weitreichenderen Einfluss auf die Allergenität der Birkenpollen hat könnte in zukünftigen Projekten untersucht werden.

Zusammenfassend lassen die derzeitigen Ergebnisse kein erhöhtes Risiko für die birken-sensibilisierten Patienten in Bayern erkennen.

6.2.3 Wachstum und Phänologie von *Ambrosia* unter künftigen Klima- und Umweltbedingungen für zwei Regionen in Bayern

A. artemisiifolia wurde während eines kompletten Entwicklungszyklus unter kontrollierten Bedingungen kultiviert, die Temperaturverhältnisse vorwegnahmen, wie sie in etwa 50 Jahren unter pessimistischen Annahmen (RCP8.5) herrschen könnten (M16.1, M16.2, Anhang 11.2).

„Niedrige“ Temperatur Münchner Schotterebene



„Hohe“ Temperatur Münchner Schotterebene (+4°C nach RCP8.5)

Abb. 6.6: Kultivierung der *Ambrosia*-Pflanzen vom Keimlingsstadium bis hin zur Pollenernte in Phytotronen des Helmholtz Zentrums München beispielhaft für den Versuch mit Simulation der Bedingungen „München“ (M16); Vergleich der Pflanzenentwicklung unter aktuellen, kühleren (obere Reihe) und künftigen (RCP8.5-Annahme) wärmeren Bedingungen (untere Reihe); jeweils von links nach rechts Sämlinge, Jungpflanzen und blühende Pflanzen und ganz rechts, Pollen-Ernte unter Vollschutz.

Zusätzlich wurden weiterhin hohe Luftbelastungen mit NO₂ als Versuchsvarianten gewählt. *Ambrosia*-Pflanzen, welche unter erhöhter Temperatur (T_{M4}, T_{M4N}, T_{W4}, T_{W4N}, siehe Tabelle 6.1) gewachsen waren, zeigten in beiden Szenarien „München (M)“ und „Würzburg (W)“ ein vitaleres Erscheinungsbild und erreichten im Vergleich zu den unter niedrigeren Temperaturen gewachsenen Pflanzen später ihre Seneszenz (Abb. 6.6). Dies zeigt, dass Temperaturerhöhungen für die wärmeliebende *Ambrosia* vorteilhaft sind (Abb. 6.6). *Ambrosia*-Pflanzen, die unter erhöhter Temperatur gewachsen waren, waren signifikant größer und hatten signifikant längere männliche Blütenstände und eine längere Pollensaison (Abb. 6.7; Abb. 6.8). Eine zusätzliche Begasung mit erhöhtem NO₂ hatte keinen Einfluss auf Wachstum und Phänologie (Abb. 6.7, Abb. 6.8). Pollenmengen ließen sich nicht bestimmen, da die Pflanzen aus versuchstechnischen Gründen beschnitten wurden.

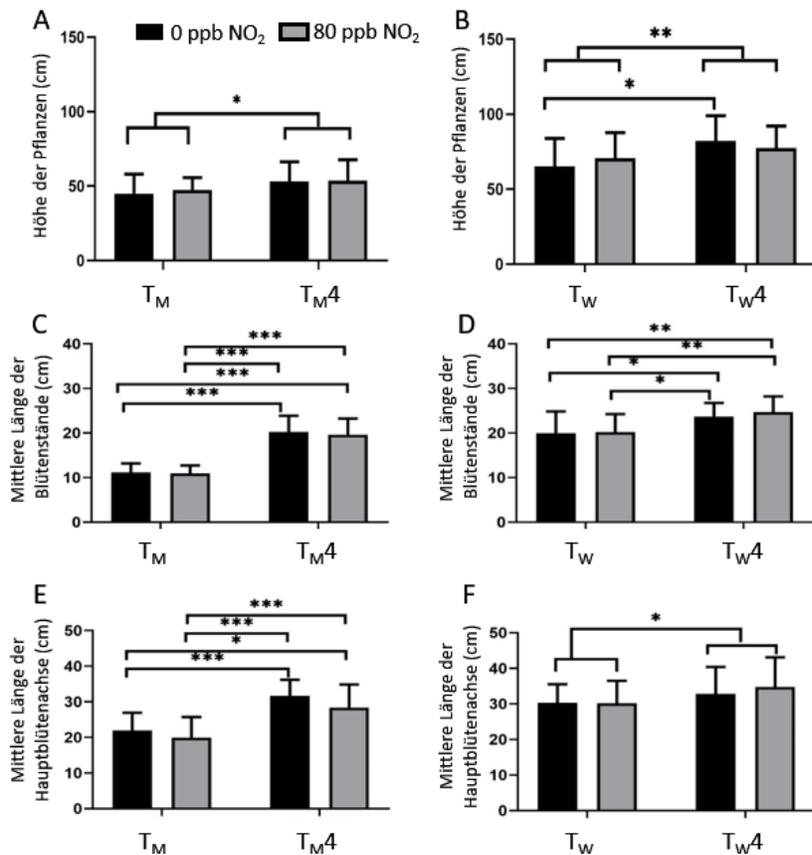


Abb. 6.7: Phänologische Daten von *Ambrosia* unter aktuellen und künftigen Klima- und Umweltbedingungen. Durchschnittliche Länge der *Ambrosia* Pflanzen für „München“ (A) & „Würzburg“ (B). Durchschnittliche Länge der Blütenstände für „München“ (C) & „Würzburg“ (D); Durchschnittliche Länge der Hauptblütenachse „München“ (E) & „Würzburg“ (F). Zweiseitige ANOVA, *** = p-Wert < 0,0002. T_M: München aktuell; T_{M4}: München aktuell +4 °C; T_W: Würzburg aktuell; T_{W4}: Würzburg aktuell +4 °C.

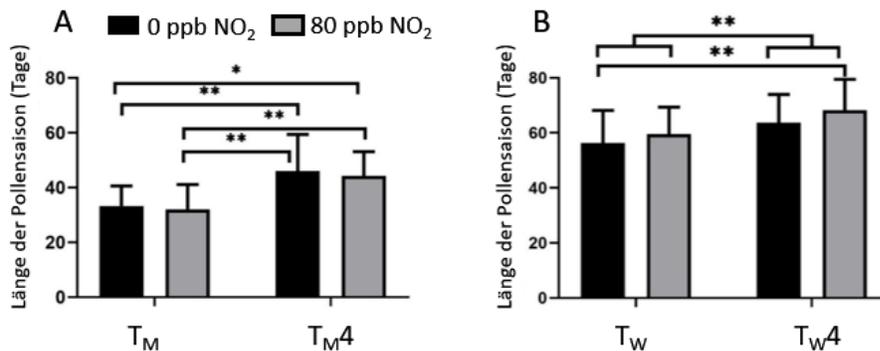


Abb. 6.8: Phänologische Daten von *Ambrosia* unter aktuellen und künftigen Klima- und Umweltbedingungen. Durchschnittliche Länge der Pollen-saison für „München“ (A) und „Würzburg“ (B). T_M: München aktuell; T_{M4}: München aktuell +4 °C; T_W: Würzburg aktuell; T_{W4}: Würzburg aktuell +4 °C.

6.2.4 Molekularbiologische und biochemische Bestimmung des allergenen Potentials von *Ambrosia*-Pollen

Lösliche Proteine wurden aus den Pollen extrahiert und auf ihr allergenes Potential hin untersucht (M 17.1, M 17.2, Anhang 11.2). Im Klimaszenario für München führte erhöhte Temperatur in Kombination mit erhöhtem NO₂-Gehalt in der Luft zu signifikant höheren IgE-Signalen. Im Szenario Würzburg hatte NO₂ hingegen keinen signifikanten Einfluss auf die IgE-Signale; hier war erhöhte Temperatur allein der ausschlaggebende Faktor, der zu einer signifikant erhöhten IgE-Bindung führte (Abb. 6.9). Im 2D-Immunoblot konnten zudem für verschiedene Allergenspots signifikante Unterschiede ausgemacht werden.

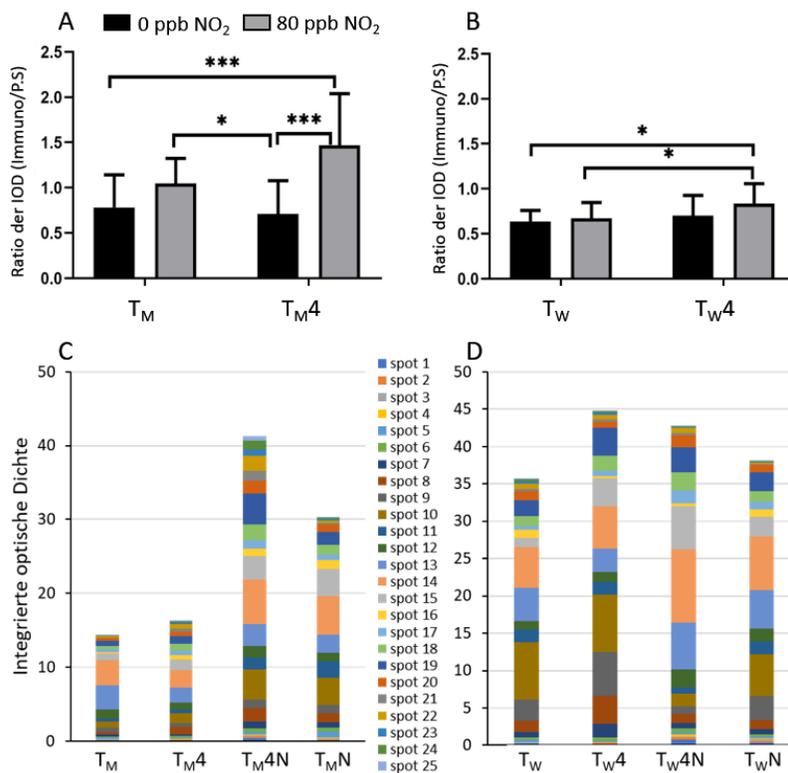


Abb. 6.9: Quantifizierung der optischen Dichte verschiedener Immunoblots. A & B: Verhältnis der integrierten optischen Dichte (IOD) von Immunoblot vs. Ponceau S Färbung detektiert mit einem Pool an humanen Seren von *Ambrosia*-sensibilisierten Patienten. A: Szenario „München“, B: Szenario „Würzburg“. C & D: Aufsummierte integrierte optische Dichte der 25 Proteinspots, die in 2D-Immunoblots detektiert wurden (n=3), T_M: München aktuell; T_{M4}: München aktuell +4 °C; T_W: Würzburg aktuell; T_{W4}: Würzburg aktuell +4 °C; N: vorige Varianten jeweils zusätzlich mit 80 ppb NO₂ in der Kammerluft.

Für beide Versuchsregionen hatte erhöhtes NO₂ alleine den geringsten Einfluss auf Änderungen im Pollenproteom, wohingegen erhöhte Temperatur im Münchner Szenario auch in Kombination mit erhöhtem NO₂ zu einem deutlichen Anstieg an signifikant aktivierten Proteinen führte (Abb. 6.10 B, C). Auch in den Würzburger Szenarien ist ein deutlicher Anstieg von signifikant aktivierten und gehemmten Proteinen durch erhöhte Temperatur ± NO₂ zu verzeichnen. In der Gruppe der signifikant aktivierten Proteine befinden sich vermehrt solche, die antioxidative Aktivität haben oder in Stressregulation involviert sind. Durch die Sequenzierung ausgewählter Proteinspots aus den 2D-Gelen, z.B. solchen die unter erhöhter Temperatur reguliert waren, wurden in verschiedenen niedermolekularen Fraktionen diverse Allergene als Hauptkomponenten nachgewiesen: Amb a 8, Amb a 3, Amb a 1.0101 und Amb a 1.0402, sowie Homologe zu Calmodulin, das in *Amaranthus palmeri* als Allergen bekannt ist. Weitere Proteinspots, die unter erhöhtem NO₂ im Münchner Szenario stärker ausgeprägt waren,

beinhalteten neben Amb a 1-Isoformen auch, Amb a 12 als Hauptkomponente. In weiteren Fraktionen wurden neben Amb a 1-Isoformen auch Amb a 11.0101 und Homologe zu Calreticulin, welches in Esche als Allergen bekannt ist als stärkste Komponente ausgemacht. Die mit Patientenseren detektierten Proteinfractionen auf den 2-D-Gelen enthielten also neben den bekannten *Ambrosia*-Allergenen auch weitere potentielle Allergene.

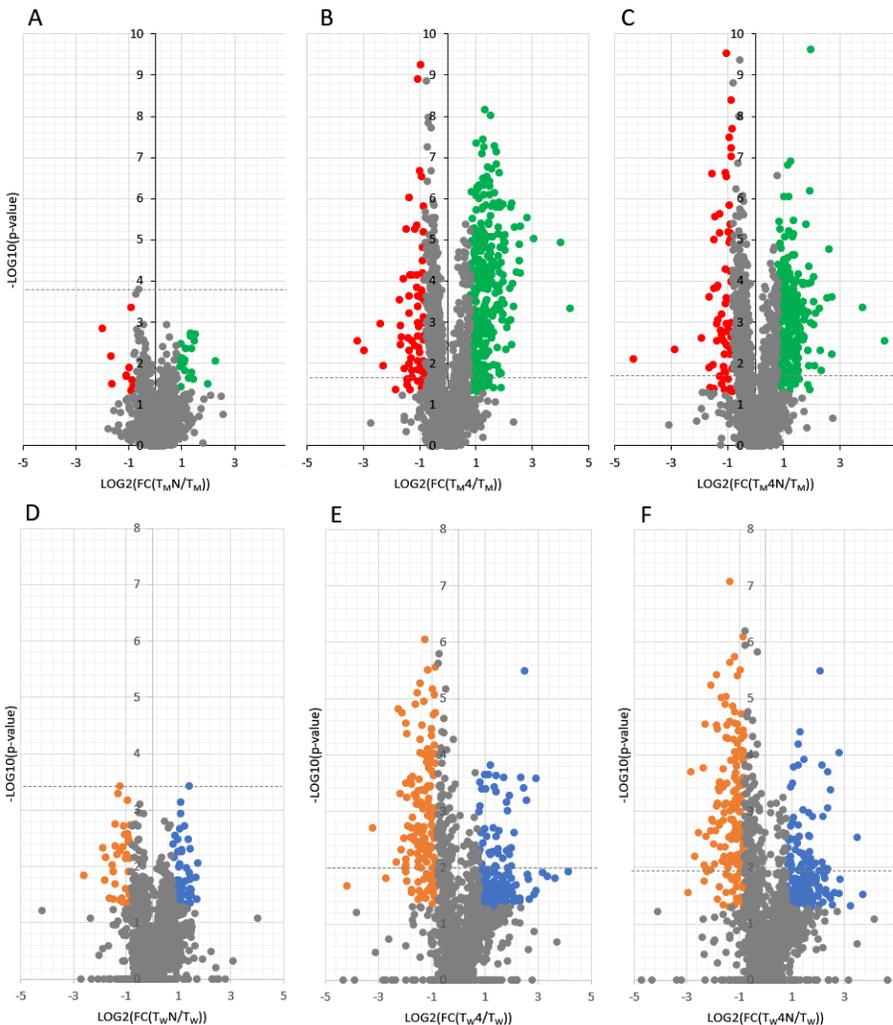


Abb. 6.10: Gesamtheit aller identifizierten Pollenproteine im Volcanoblot. Durch das Verhältnis zwischen der Proteinabundanz der Behandlung durch die Kontrolle wird dargestellt, wie viele Proteine im Vergleich zur Kontrolle signifikant aktiviert oder gehemmt wurden. A-C: Münchner Szenarien für erhöhtes NO_2 (A); erhöhte Temperatur (B) und die Kombination aus erhöhter Temperatur mit erhöhtem NO_2 (C). D-E: zeigt die Ergebnisse für die entsprechenden Szenarien für Würzburg. Rot bzw. orange dargestellt sind Proteine, die gegenüber der Kontrolle signifikant und um mindestens den Faktor 1,754 reduziert sind. Grün bzw. blau steht für Proteine, die gegenüber der Kontrolle signifikant mindestens um den Faktor 1,754-fache erhöht sind. In grau dargestellt sind Proteine, die entweder nicht signifikant geändert waren oder innerhalb der gesetzten Grenzen lagen. Die gestrichelten Linien geben das Signifikanzniveau nach FDR-Korrektur an ($n=3$); T_M : München aktuell; T_{M4} : München aktuell +4 °C; T_W : Würzburg aktuell; T_{W4} : Würzburg aktuell +4 °C; N: vorige Varianten jeweils zusätzlich mit 80 ppb NO_2 in der Kammerluft.

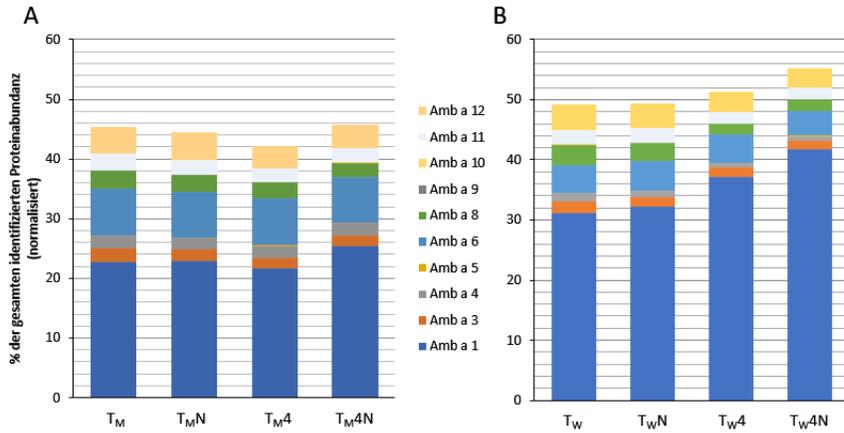


Abb. 6.11: Massenspektrometrisch bestimmte Allergenabundanz bezogen auf die Gesamtproteinmenge in Prozent. A: Münchner Szenarios. B: Würzburger Szenarios. T_M: München aktuell; T_{M4}: München aktuell +4 °C; T_W: Würzburg aktuell; T_{W4}: Würzburg aktuell +4 °C; N: vorige Varianten jeweils zusätzlich mit 80 ppb NO₂ in der Kammerluft.

Massenspektrometrisch quantifizierte Allergene wiesen im Gegensatz zu den Immunoblots keine signifikanten Unterschiede für die verschiedenen Klimaszenarien auf (Abb 6.10). Allerdings wiesen Proben aus den Würzburger Szenarien leicht erhöhte relative Allergenabundanzen gegenüber den Münchner Szenarien auf (Abb. 6.11). Unter den „Münchner Versuchsbedingungen“ waren alle Allergene unterhalb der Grenze von ±1,754-facher Veränderung. Im Würzburger Szenario mit erhöhter Temperatur in Kombination mit erhöhtem NO₂, wurde ein leicht erhöhter Wert (1,34-fach, p-value ≤0,05 nach FDR) für das Haupt-Allergen Amb a 1 bestimmt. Dagegen waren unter ebendiesen Bedingungen die Neben-Allergene Amb a 4 und Amb a 8 signifikant erniedrigt. Amb a 10 war unter allen drei Bedingungen (erhöhte Temperatur mit/ohne erhöhtem NO₂) gegenüber der Kontrolle reduziert. Erhöhte Temperatur führte zudem zu einer signifikanten Reduktion des Neben-Allergens Amb a 5.

Die Quantifizierung des Hauptallergens Amb a 1 mit ELISA zeigte eine signifikant erniedrigte Menge Amb a 1 unter erhöhter Temperatur sowohl im Münchner und Würzburger Szenario Abb. 6.12). Zusätzliche Stickoxidbelastung der Luft hatte keinen signifikanten Einfluss gegenüber den Allergengehalten der jeweiligen Kontrollen (T_M bzw. T_W).

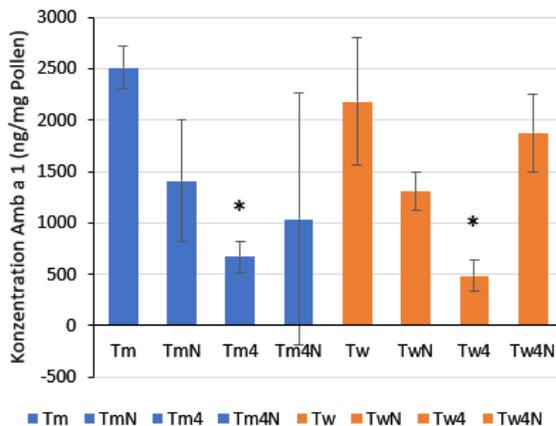


Abb. 6.12: Mittels spezifischem ELISA quantifiziertes *Ambrosia*-Hauptallergen Amb a 1 in Pollenproben aus den Phytotronversuchen mit *Ambrosia*, statistisch signifikante Ergebnisse (T-test, p < 0,5, n=3) sind mit einem Stern (*) gekennzeichnet; T_M: München aktuell; T_{M4}: München aktuell +4 °C; T_W: Würzburg aktuell; T_{W4}: Würzburg aktuell +4 °C; N: vorige Varianten jeweils zusätzlich mit 80 ppb NO₂ in der Kammerluft.

Um die bestehende Diskrepanz zwischen Ergebnissen von Immunoblots, ELISA und massenspektrometrischen Analysen differenzierter interpretieren zu können, wurden die

Pollenextrakte weiter untersucht. Reaktive Sauerstoffspezies und H₂O₂-Gehalt der Pollenextrakte waren weder für die Münchner noch für die Würzburger Szenarien signifikant unterschiedlich noch ergaben sich Unterschiede zwischen den Behandlungen. Anders verhielt es sich bei den ermittelten Flavonoidgehalten. Flavonoide werden als mögliche Interaktionspartner mit Proteinen/Allergenen diskutiert [85]. Flavonoidgehalte unterschieden sich bei den Münchner Szenarien signifikant zwischen NO₂-behandelten und nicht NO₂-behandelten Pflanzen, sowie innerhalb Würzburger Szenarien zwischen den Pflanzen mit oder ohne Temperaturerhöhung (Abb. 6.13 A). Ob diese Flavonoide einen Einfluss auf die Allergeninteraktion haben, wurde in ersten Dot-Blot Versuchen getestet.

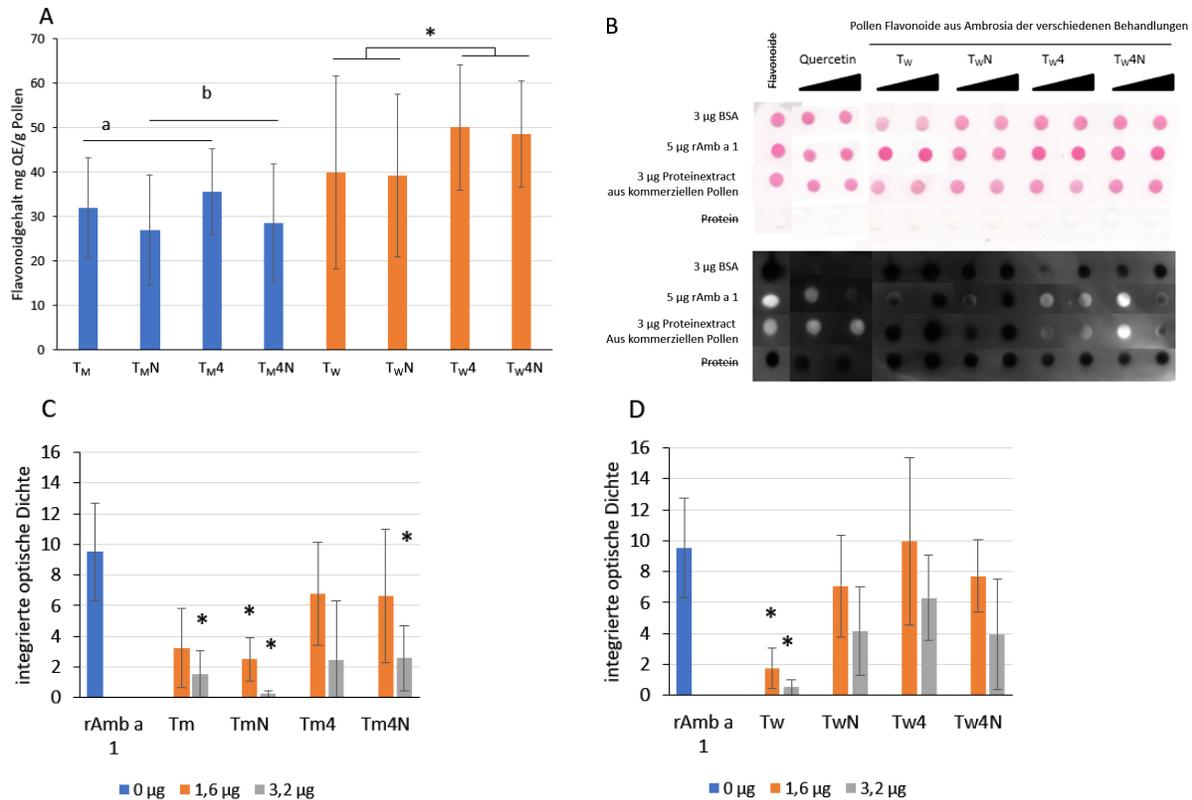


Abb. 6.13: Flavonoidgehalte aus Pollen verschiedener Behandlungen und deren Einfluss auf Allergen-Antikörper-Interaktion. A: Flavonoidgehalte aus Pollen von *Ambrosia* Pflanzen aus Münchner (blau) und Würzburger (orange) Klimaszenarien. Signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen sind durch a, b und * gekennzeichnet. B: Einfluss von Flavonoiden aus verschiedenen Behandlungen auf die Allergen-Antikörper-Interaktion am Beispiel von Würzburger Klimaszenarien. Ponceau-S-Färbung der Proteine (oben) und Immunoblot-Ergebnisse (unten). Die Immunoblots wurden mit Seren (1:100) von *Ambrosia*-Pollenallergikern durchgeführt. Beladene Flavonoidmengen waren 1,6 µg und 3,2 µg. Proteinquellen: (i) rAmb a 1 und (ii) Proteinextrakte aus kommerziellen *Ambrosia*-Pollen. rAmb a 1 wurde als Positivkontrolle für die verwendeten Seren verwendet, während BSA als Negativkontrolle eingesetzt wurde. C und D: zeigen die statistische Auswertung der Interaktion von Flavonoiden aus Pollen der verschiedenen Klimazentralen mit dem rekombinanten Hauptallergen Amb a 1, detektiert mit humanen Seren. C. München D: Würzburg; T_M: München aktuell; T_M4: München aktuell +4 °C; T_W: Würzburg aktuell; T_W4: Würzburg aktuell +4 °C; N: vorige Varianten jeweils zusätzlich mit 80 ppb NO₂ in der Kammerluft.

Dazu wurde verschiedene Flavonoidkonzentrationen aus den Pollen der verschiedenen Klimaszenarien mit entweder rekombinant hergestelltem Amb a 1 oder Proteinextrakten aus kommerziellen *Ambrosia*-Pollen gemischt und im Anschluss mit einem spezifischen Amb a 1-

Antikörper bzw. humanen Seren detektiert. Abhängig von der Konzentration und dem Klimaszenario zeigten die Antikörper unterschiedliche Bindeaktivitäten. Die Allergen-Antikörper-Interaktion wurde durch Flavonoide aus den Klimaszenarien Würzburg mit erhöhtem NO₂ stärker gehemmt als durch die Flavonoide des Szenarios mit erhöhter Temperatur alleine (Abb. 6.13 B). Eine statistische Auswertung dieser Interaktionen zeigte eine signifikant reduzierte Interaktion zwischen rekombinant hergestellten Amb a 1 und Patientenseren, wenn Flavonoide aus den Kontroll-Szenarien zum Einsatz kamen. Ein ähnliches Bild ergab sich auch unter der Verwendung von Proteinen aus Pollenextrakten. Bei erhöhten Temperaturen war eine Hemmung der Allergen-Antikörper-Interaktion nur bei der höheren Konzentration an Flavonoiden zu sehen (Abb. 6.13 C, D). Im Umkehrschluss könnte dies bedeuten, dass es unter zukünftigen Klimaszenarien durch die geringere Interaktion mit den Flavonoiden zu stärkeren Interaktionen zwischen Allergen und Antikörper und somit zu stärkeren allergischen Reaktionen führen könnte. Welche Mechanismen dieser unterschiedlichen Reaktion zugrunde liegen, z.B. ob sich die Zusammensetzung der Flavonoide unter den verschiedenen Bedingungen verändert hat, müsste in weitergehenden Analysen untersucht werden.

Als Beispiel für posttranslationale Modifikationen, welche auch die Allergene betreffen können, wurden in ersten Versuchen Proteinnitrierungen nachgewiesen. Inwieweit es in Abhängigkeit vom Umweltszenario zu Unterschieden im Nitrierungsgrad kommt, konnte aufgrund von technischen Problemen und Lieferschwierigkeiten für molekularbiologische Reagenzien zum Berichtszeitpunkt noch nicht abschließend bestimmt werden.

Die Diskrepanz zwischen den signifikant erniedrigten Mengen des Hauptallergens Amb a 1 im ELISA und der erhöhten Allergenität in den Immunoblots unter erhöhter Temperatur kann verschiedene Ursachen haben, wie entsprechend für Birkenallergene in Abschnitt 6.2.2 bereits erläutert wurde. Zum einen wurden in den Immunoblots Patientenseren verwendet, die auch andere Allergene als Amb a 1 erkennen, während der Antikörper im ELISA spezifisch nur Amb a 1 nachweist. Dass dies eine mögliche Erklärung ist, zeigten die Analysen der Proteinfractionen aus den 2-D Immunoblots. Desweiteren können die oben genannten weiteren Faktoren wie Flavonoide oder posttranslationale Proteinmodifikationen die Bindung zwischen Antikörpern und Allergenproteinen beeinflussen. Dabei ist die Richtung der Änderung, ob bessere oder schlechtere Bindung auch von den Antikörpern abhängig, die im ELISA mit monoklonalen Antikörpern andere sind als in den Patientenseren.

Obwohl sich einige Qualitätsaspekte von *Ambrosia*-Pollen (markierungsfreie Quantifizierung von Allergenen, NAD(P)H-Oxidase-Aktivität, H₂O₂-Gehalt) unter höherer Temperatur nicht veränderten, und sich auch die Mengen des Hauptallergens nicht veränderten (Massenspektrometrie) bzw. erniedrigten (ELISA), zeigten Immunoblots mit Patientenseren ein signifikant erhöhtes allergenes Potential. Auch die geänderte Flavonoidzusammensetzung und deren Einfluss auf die Allergene könnten sich auf das allergene Potential von *Ambrosia* auswirken. Zusammen mit dem besseren Pflanzenwachstum unter höheren Temperaturen und der längeren Pollensaison könnte sich dies in Zukunft negativ auf die *Ambrosia*-Atopiker in Bayern auswirken.

7 Zusammenfassende Diskussion der Ergebnisse zum Einfluss des Klimawandels auf Pollen

7.1 Experimentelle Simulationen künftiger Klimabedingungen

Ziel der experimentellen Simulation in verschiedenen Pflanzenversuchen war es, die Auswirkungen von Klimawandel auf Eigenschaften der Pollen allergener Pflanzen unter kontrollierten Bedingungen untersuchen zu können. Dazu nutzten wir unterschiedlich komplexe Versuchssysteme. Wir waren mit der Phytotronanlage am Helmholtzzentrum München in der Lage, programmierbare und damit hochkontrollierte Bedingungen (natürliche Lichtqualität, Luftfeuchte, Gasatmosphäre) für Pflanzenversuche mit *Ambrosia* zu schaffen unter heutigen und künftigen Bedingungen und zudem mit einer hochallergenen Pflanze, die aus gesundheitlichen Gründen nicht gezielt im Freiland oder Gewächshaus zum Blühen gebracht werden kann. Trotz des stark variablen genetischen Hintergrunds von *Ambrosia*, der sich in sehr hohen Varianzen in den Daten bemerkbar macht, bestätigte sich, dass erhöhte Temperaturen *Ambrosia* fördern und das Allergierisiko steigern. Trotz dieser hohen genetischen Variabilität, war der Einfluss von erhöhten Stickoxidkonzentrationen wie sie heute an vielbefahrenen Straßen vorkommen eindeutig belegt. Eine Reduzierung der Stickoxide würde also auch die Allergenität der Pollen in Zukunft verringern und sollte entsprechend der Handlungsempfehlungen (siehe Abschnitt 8) umgesetzt werden.

Für größere Pflanzen, die in Phytotronen nicht mehr adäquat Platz finden wie z.B. Birken wurden Experimente mit getopften Pflanzen im Gewächshaus und Zweigexperimente in Klimakammern der TU München und in Phytotronen des Helmholtzzentrums München durchgeführt, und jeweils mit Pflanzen, bzw. Zweigen verglichen, die unter Freilandtemperaturen verblieben waren. Dabei zeigte sich einerseits, dass auch mit der relativ einfachen, leicht zu implementierenden Zweigmethode Pollen für weiterführende Analysen gewonnen werden können, und dass deren Eigenschaften - auch bei Manipulation von Umgebungsbedingungen - mit denen im Freiland übereinstimmt. Hier zeigen sich vielversprechende Forschungsmöglichkeiten gerade an verholzten Arten mit allergenem Pollen (z.B. Hasel, Erlen- und Birkenarten). Andererseits zeigten die Simulationsexperimente mit intakten Birken, dass die Frühjahrsblüte von Birken sehr stark von den Vorjahresbedingungen abhängt, was wiederum nur mit wachsenden, mehrjährigen Pflanzen in Versuchen kontrolliert getestet werden kann.

Modellierungen könnten herangezogen werden, um den Einfluss von Vorjahresbedingungen auf die Pollenmengen zu untersuchen, und darauf aufbauend Modelle um diesen Aspekt ergänzen. Weiterhin könnten z.B. systematische jährliche Pollensammlungen aus dem Freiland und in Kombination mit der in KLIMApollen bestätigten Zweigmethode hinsichtlich ihrer Allergenität getestet werden und zusammen mit den beobachteten Pollenmengen und phänologischen Daten in Modellierungen einfließen, um ein noch exakteres Bild der potentiellen Belastung für Allergiker zu liefern.

7.2 Modellerte Szenarien künftiger Klimabedingungen

Klimawandel verändert die reproduktiven Lebenszyklen von Pflanzen einschließlich der Pollenproduktion. Der Blick in die Vergangenheit hat deutliche Änderungen in der Pollenproduktion und Pollensaison in Bayern aufgezeigt. Schwerpunkt der gemeinsamen Untersuchungen waren dabei längere (10+ Jahre) Datenreihen mit Pollenflugdaten von 8 Messstationen.

Wind-bestäubte Bäume (Erle, Birke und Eibe) zeigen eine Verfrühung des Starts-, Peak- und Enddatums der Pollenemissionen sowie eine insgesamt erhöhte Pollenproduktion. Vor allem für frühblühende Arten waren starke Veränderungen festzustellen. Für Kräuter (z.B. Gräser und Brennessel) wurde teilweise eine längere Pollensaison beobachtet. Obwohl Wasser in Bayern im Mittel ausreichend vorhanden ist, zeigt der negative Effekt einer geringeren Wasserverfügbarkeit auf den Pollenflug, dass die beobachtete und prognostizierte Verschärfung der Intensität und Häufigkeit von Dürreereignissen in Frühjahr und Sommer in die Abschätzung der zukünftigen Pollenbelastung durchaus mit einzubeziehen ist.

Die Veränderungen des Pollenflugs waren ähnlich an allen Standorten, signifikant jedoch nur an einigen. Die berechneten Trends waren allerdings stark von der verwendeten statistischen Methode abhängig, so dass immer die robusteren phänologischen Trends (Blühtermine) zusätzlich einbezogen werden sollten. Wenn wir annehmen, dass ein früher einsetzender, stärkerer sowie länger andauernder Pollenflug zu mehr Allergiesymptomatik führt, ist der Effekt des Klimawandels auf die Allergiesymptomatik in Bayern bereits jetzt deutlich.

Unsere Modellierungen zeigen, dass sich in Bayern bis 2085 die Birkenpollenbelastung unterschiedlich entwickeln wird, da die die Anzahl der Birkenbäume regional zu- bzw. abnehmen wird: im Kerngebiet der Birke im Bayerischen Wald wird deren Bestand und damit der Birkenpollenflug abnehmen; in den höheren Lagen der Alpen dagegen zunehmen. Diese Abschätzung beruht auf der Annahme konstanter, d.h. unveränderten Randbedingungen. Bedenkt man zusätzlich die klimawandelbedingte Zunahme von Extremereignisse, werden Störungen in der Forstwirtschaft (Borkenkäferkalamitäten, Dürren, Stürme) zu mehr Freifächensituationen führen. Auf diesen Flächen werden sich vermehrt Pionierarten wie die Birke zumindest übergangsweise etablieren, so dass die Birkenpollenbelastung durch den Klimawandel deutlich zunehmen könnte.

Die Gräserpollenbelastung wird dagegen in Bayern überall zunehmen. Diese Prognosen sind grundsätzlich gebietsabhängig und unterschiedlich je nach Klimawandelszenario: bei stärkerer Erwärmung treten die Änderungen schneller und ausgeprägter auf. Aus der Literatur gibt es Hinweise, die kombinierte interagierende Wirkung von Erwärmung, Hitzewellen und Dürren auf Graslandssysteme zu betrachten. Generell gilt auch hier, dass die oben beschriebene Abschätzung aus der Modellierung nur unter konstanten Modell(rand)bedingungen gültig ist. Die detaillierte Untersuchung der Gräserpollenemissionen unter verschiedenen Landnutzungen hat gezeigt, dass in der Landwirtschaft, die ja den Großteil der Wiesen und Weiden mit Grasvegetation bewirtschaftet, die Bewirtschaftungsintensität (z.B. mit Schnitterminen und –frequenzen) die Wahrscheinlichkeit der Pollenemission maßgeblich beeinflusst: Viele Schnitte bedingen einen frühen ersten Schnitt und damit wenig Gräser, die zur Blüte kommen. Ähnlich

können verschiedene geförderte Agrar- und Umwelt sowie Klimaschutzmaßnahmen zu veränderten Schnittterminen, d.h. Wahrscheinlichkeiten der Graspollenemission, führen.

Das Projekt hat des Weiteren klar aufgezeigt, dass neben lokalen Quellen, der Pollenferntransport in Bayern eine große Rolle spielt. So verursachen Pollen der Grünerle aus dem Alpenraum einen „Nach-“Pollensaisonpeak im Juni, lange nachdem die Schwarz- und Grauerlen im Flachland geblüht haben. Ebenso kann Pollenferntransport vor der eigentlichen Hauptsaison, die durch die Blüte vor Ort bestimmt wird, den Start der Pollensaison um 17 Tage im Mittel deutlich nach vorne verschieben. Dieses Phänomen tritt in circa 2/3 aller Jahre auf, auch mit gesundheitsrelevanten atmosphärischen Konzentrationen, wie die Untersuchungen im Rahmen der Pollentransportklimatologie in diesem Projekt gezeigt haben. Deshalb erscheint es unerlässlich, die Vegetation außerhalb Bayerns und den Transport von Pollen nach Bayern in Abschätzungen der zukünftigen Pollenbelastung der bayerischen Bürger*innen sowie in Frühwarnsystemen zu berücksichtigen

Zusammenfassend ergeben sich die im folgenden Kapitel 8 dargestellten Möglichkeiten der Nutzung der Projektergebnisse zur Erarbeitung von Handlungsperspektiven.

8 Darstellung des Nutzens im Rahmen der Bayerischen Klimaanpassungsstrategie

Die Bayerische Staatsregierung hat zum Schutz der Bevölkerung vor den Folgen des Klimawandels im Klimaprogramm 2020 und in der Bayerischen Klimaanpassungsstrategie Handlungs- und Anpassungsmaßnahmen entwickelt [3, 86, 87]. Diese umfassen Frühwarnsysteme, um konkrete Warnungen und Verhaltensregeln z.B. bei Pollenflug auszugeben. Eine weitere Anpassungsstrategie ist die verstärkte Aufklärung der Bevölkerung und des medizinischen Personals zu neuen gesundheitlichen Gefahren. Die Ergebnisse des Projekts KLIMApollen tragen hierzu bei.

Die erarbeiteten Ergebnisse zu Veränderungen in Pollenart – und mengen unter künftigen Klimabedingungen (siehe Beispiel Birke), sowie zu Änderungen allergener Potentiale unter verschiedenen Umweltbedingungen stellen eine fundierte Datengrundlage zur Einschätzung künftiger Risiken in Bezug auf Pollenallergien in Bayern dar und unterstützen wissenschaftlich und mit praktischen Empfehlungen den Maßnahmenkatalog zur Klimaanpassung in der Menschlichen Gesundheit [87], Tab. 30].

Konkret unterstützen die Ergebnisse zur Allergenität von *Ambrosia* die Notwendigkeit sowohl weiterhin die Ausbreitung durch das „Aktionsprogramm Ambrosiabekämpfung“ konsequent zu verhindern [87], WK_09], als auch die Maßnahmen zur Luftreinhaltung besonders die Reduzierung von Stickoxiden zu forcieren [87], WK_02].

Die Datenbank zu Menge und Verteilung von Pollen mit gemessenen Zeitreihen vergangener Jahre sowie die modellierten Daten für künftig zu erwartende Pollensituationen, stehen für weitere Untersuchungen und Fragestellungen zur Verfügung und unterstützen somit die Maßnahmen zu Monitoring der atmosphärischen Pollenkonzentration [87], WK_08].

Die fertiggestellte App ist dazu gedacht, betroffenen Allergikerinnen und Allergikern einen Hinweis geben, mit welchen Arten von Pollenbelastungen künftig regional zu rechnen ist. Die App kann außerdem als erster Anhaltspunkt und einfache erste Einschätzung der regionalen Situation genutzt werden, um Aspekte für Allergiker in Pläne für künftige Landnutzung und Landmanagement einzubeziehen. Entsprechend wichtig ist es, das Allergiemonitoring [[87]_WK_08] fortzusetzen und damit die entsprechende Datenlage kontinuierlich auf den neuesten Stand zu bringen.

Die Modellierungsergebnisse zeigen, dass in einigen Regionen Bayerns bestimmte allergene Pflanzen klimabedingt zu oder abnehmen (Beispiel Birke). Bei Gräserpollen spielt dagegen die Art der Landnutzung eine große Rolle, wobei potentielle Gräserpollenemissionen durch höhere Schnitffrequenzen eher reduziert werden, während sie durch Agrarumwelt- und Klimaschutzmaßnahmen (AUM) wahrscheinlich steigen. Entsprechend könnten Planungen dahingehend modifiziert werden, gezielt einzugreifen, beispielsweise um Risiken und Nutzen von Extensivierungsmaßnahmen oder anderer Landnutzungsänderungen gegeneinander abzuwägen [87], WK_08].

Durch das Forschungsprogramm „Gesundheitliche Folgen des Klimawandels in Bayern“ wurde ein Förderrahmen geschaffen, mit dem relevante und aktuelle Forschungsprojekte im Bereich Klimawandel und Gesundheit gefördert werden. Mit Abschluss des Projekts KLIMApollen sind wesentliche Erkenntnisse für weitere Handlungsperspektiven erarbeitet worden. Da die Modellierungsergebnisse den aktuellen Kenntnisstand zugrunde legen und Annahmen über künftige Ereignisse machen, sollten die Ergebnisse in regelmäßigen Zeitabständen z.B. alle 5 Jahre mit aktuellen Pollen- und Klimadaten überprüft werden, z.B. im Rahmen des Maßnahmenkatalogs zum Monitoring der atmosphärischen Pollenkonzentration, der Allergenität von Pflanzen sowie Prognose der zu erwartenden Pollenbelastung [87], WK_08].

9 Glossar

Adjuvante Agenzien	Hilfsstoffe, welche eine allergische Reaktion verstärken können, ohne selbst allergen zu sein
allergen / Allergen	Allergie auslösend / Allergie auslösende Substanz
allergenes Potential	die Möglichkeit als Allergen zu wirken oder Allergien auszulösen
ANOVA	Die Varianzanalyse (ANOVA) ist eine Sammlung von statistischen Modellen und den damit verbundenen Schätzverfahren (z.B. die "Variation" zwischen und zwischen Gruppen), die zur Analyse der Unterschiede zwischen den Gruppenmitteln in einer Stichprobe verwendet werden.
Antigen	Substanz, gegen die Antikörper gebildet werden können
Antikörper	Eiweißmolekül, das vom Körper produziert wird, um Antigene zu binden und diese so für das Immunsystem erkennbar zu machen
Amb a	Allergene von <i>Ambrosia artemisiifolia</i> , unterschiedliche Nummerierungen verweisen auf spezifischen Allergene
AUM	Agrarumweltmaßnahmen umfassen das Kulturlandschaftsprogramm (KULAP) sowie das Vertragsnaturschutzprogramm inklusive Erschwernisausgleich, die z.T. auf spätere Schnitttermine im Grünland zielen.
Beginn der Blüte	Laut DWD wird die Phase „Beginn der Blüte“ nach der Entwicklung der männlichen Blütenorgane, der Staubblätter, beurteilt. An mindestens drei Stellen (Bereichen) des Beobachtungsobjektes sollen sich die ersten Blüten vollständig geöffnet haben.
Bet v	Allergene von <i>Betula verrucosa</i> (synonym <i>B. pendula</i>) Hängebirke; unterschiedliche Nummerierungen verweisen auf spezifischen Allergene.
Birkenpollen	in Bayern kommen 2 Birkenpezies vor: <i>Betula pendula</i> und <i>Betula pubescens</i> , die als ein Pollentyp zusammengefasst sind.
Chemilumineszenz	bezeichnet die Emission von Licht durch chemische Vorgänge. Beim Immunoblot, setzt ein an den Antikörper gekoppeltes Enzym ein Substrat um. Das dabei erzeugte Licht kann über eine Kamera detektiert werden.
CRM	Concentric Ring Method. Methode, die das Vorkommen von Allergenquellen mit dem Vorkommen von Pollen am Messort korreliert. Um den Messpunkt werden (hier) 1-km Ringe gezogen und das Vorkommen der Pflanze in diesem Ring durch Vergleich mit der Spezies-Verteilungskarte berechnet. Weil bekannt ist, wie viel eine Quelle (je nach Abstand) zu dem Messwert beiträgt, kann die Pollenbelastung am Messpunkt ermittelt werden.
Dot-Blot-Analyse	spezielle Form eines Immunoblots, bei dem die zu untersuchende Substanz direkt auf eine Membran transferiert wird, siehe Immunoblot
DWD	Deutscher Wetterdienst
Flavonoide	Flavonoide sind als sekundäre Pflanzenstoffe universell in Pflanzen vorhanden. In der Natur gibt es rund 8000 Flavonoide. Sie zählen zur Gruppe

	der Polyphenole und weisen z.T. nachgewiesene antioxidative Eigenschaften auf.
Fungizid	chemischer oder biologischer Wirkstoff, der Pilze und Sporen abtötet
Gräserpollen	Gräserpollen sind durch heutige Monitoringssysteme nicht auf Speziesniveau differenzierbar. Alle Pollen von allen Gräserarten (<i>Dactylis glomerata</i> , <i>Phleum pratense</i> , <i>Lolium perenne</i> , etc.) werden als ein Pollentyp zusammengefasst.
H ₂ O ₂	Wasserstoffperoxid, tritt in Pflanzenzellen als Zwischenprodukt auf und kann ein Anzeichen für oxidativen Stress bedeuten.
Hauptblütenachse	Bei traubigen Blütenständen, wie es bei <i>Ambrosia</i> der Fall ist, ist die Hauptblütenachse länger und stärker ausgebildet als an den Seitenachsen.
HYSPLIT	Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model (HYSPLIT) ist ein Computermodell zur Berechnung der Trajektorien von Luftpaketen, um beispielsweise für eine Pollenfalle zu bestimmen, von wo und aus welcher Richtung ein Luftpaket mit Pollen kommt.
Immunoblot	biochemische Methode, bei der eine Testsubstanz, von der man vermutet, dass sie ein Antigen enthalten könnte (z.B. ein Pollenextrakt) an eine Membran gebunden wird. Gibt man nun Antikörper zu, die an Antigene in der Testsubstanz binden, kann mit Hilfe einer weiteren Reaktion die Bindung dieser Antikörper nachgewiesen werden. Bei einem positiven Nachweis lässt sich daraus schließen, dass in der Testsubstanz Antigene enthalten waren.
immunologisch	die Immunreaktion betreffend
InVeKoS	InVeKoS (Integriertes Verwaltungs- und Kontrollsystem) ist ein durch die Europäische Kommission schrittweise eingeführtes System von Verordnungen zur Durchsetzung einer einheitlichen Agrarpolitik in den EU-Mitgliedstaaten.
Integrierte Optische Dichte	Summe der Pixeltiefe (d.h. Pixelintensität oder Anzahl) über einen ausgewählten Bereich; dient zur Quantifizierung von optischen Signalen (z.B. Auswertung von Immunoblots)
Jährliches Pollenintegral	Summe der täglichen Pollenkonzentrationen (24 Std. Mittelwerten) in einem Jahr
Kätzchen	Blütenstand an Bäumen und Sträuchern verschiedener Pflanzengattungen
klonal / Klonpflanze	durch vegetative Vermehrung entstanden / genetisch identische Pflanzenindividuen
Klimakammer	Klimakammern gibt es in verschiedenen technischen Ausführungen und Dimensionen für unterschiedliche Zwecke. Für Pflanzenversuche sind in der Regel Temperatur, Licht-Tages-/Nachtrhythmen steuerbar. Für die Zweigexperimente wurden solche relativ einfachen Klimakammern genutzt, um kontrollierte Temperaturbedingungen zu erzeugen. Für die technisch sehr hochgerüsteten, weltweit in der Form einmaligen Phytotrone (siehe dort) wurde zur besseren Unterscheidung der Begriff „Klimakammer“ nicht verwendet.

LfL	Bayerische Landesanstalt für
LfU	Bayerisches Landesamt für Umwelt
LGL	Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Pflege
massenspektrometrisch	durch Massenspektrometrie bestimmte Massen von Molekülen; die zu untersuchenden Moleküle in unserem Fall Proteine, werden dabei in die Gasphase überführt, ionisiert, durch ein elektrisches Feld beschleunigt und am Analysator nach ihrem Masse-zu-Ladung-Verhältnis sortiert; in TP 3 verwendete markierungsfreie Protein Quantifizierungsmethode
Messungen der Pollenkonzentrationen	Pollen werden über einen bestimmten Zeitraum aktiv durch Impaktion eines bekannten Luftstromvolumens eingefangen und mikroskopisch erfasst. Dabei wird aus der Menge an gesichteten Pollen die Pollenkonzentration berechnet. Normalerweise wird die Pollenkonzentration als Mittelwert über 24 Std. angegeben.
NADPH-oxidase	Unter der Vermittlung der NADPH-Oxidase wird aus Sauerstoff und Nicotinsäureamid-Adenin-Dinukleotid-Phosphat (NADPH), das Hyperoxidanion O_2^- erzeugt, aus dem wiederum eine Reihe weiterer reaktiver Sauerstoffspezies entstehen können.
Phänologie	"Lehre von den Erscheinungen". Gemeint sind die periodischen Wachstums- und Entwicklungserscheinungen aller pflanzlichen und tierischen Lebewesen in ihren zeitlichen Abhängigkeiten. Die Phänologie untersucht die Entwicklung der Pflanzen und Tiere im Jahresablauf indem sie die Eintrittszeiten auffälliger Erscheinungen notiert. Bei Pflanzen sind dies z.B. Daten für Blattentfaltung, Blüte oder Fruchtreife und bei Tieren Daten für periodische Wanderungen oder bestimmte Verhaltensweisen. Die Phänologie erforscht auch die Zusammenhänge zwischen der biologischen Rhythmik und den Umwelteinflüssen, insbesondere den Witterungs- und Klimaverhältnissen.
phänologische Merkmale	Kennzahlen des Entwicklungsstadiums einer Pflanze, wie z.B. Datum des Anfangs der Pollenfreisetzung, das Peakdatum, Enddatum der Pollenfreisetzung usw.
PHD	Pollen Hayfever Diary. Online-Tagebuch, in das Allergiker ihre Allergie-Symptomatik (beispielsweise über die App "Pollen") täglich eingeben können. Diese App hat gleichzeitig Zugriff auf die Pollenflugdaten. Das PHD ist Eigentum der Universität Wien und im Projekt durch die Universität Wien und den PID zur Verfügung gestellt worden.
Phytotron	Spezifische Umweltsimulationsanlage für Pflanzenversuche, in der Licht, Luftfeuchte, Temperatur exakt so eingestellt werden können, dass sie vorgegebenen Szenarien folgen. Ganze Vegetationsperioden können so simuliert werden. In den Phytotronen des Helmholtz Zentrums München besteht eine Phytotronkammer aus 4 Unterkammern, deren Gasatmosphäre sich jeweils getrennt regulieren lässt. Für KLIMApollen wurden für jeden Versuch 2 Phytotronkammern mit unterschiedlichen Temperatursimulationen genutzt.
Phytotronexperimente	Experimente, die im Phytotron durchgeführt werden

PID	Stiftung Deutscher Polleninformationsdienst
Pollenflugsaison	Hier speziell für die Untersuchungen in TP1. Anfang, Höhepunkt & Ende können erst nach Ende einer Pollenflugsaison berechnet werden. Anfang: der Tag im Jahr, wenn 2,5% des jährlichen Pollenintegrals bereits geflogen sind. Höhepunkt: Tag im Jahr mit der höchsten Pollenkonzentration (24 Std. Mittelwert). Ende: Tag im Jahr, wenn 97,5% des jährlichen Pollenintegrals geflogen sind.
Pollenkurve	Theoretisch zu erwartender saisonaler Verlauf der Pollenfreisetzung ohne Einfluss lokaler Wetterbedingungen wie z.B. Regen oder Wind.
Pollenquellregion	Region, aus der die Pollen, die an einer Station gemessen werden, wahrscheinlich stammen.
Pollensaison	Zeitdauer, in der Pollen in erheblichen Konzentrationen an einem Ort in der Atmosphäre vorhanden sind. Oftmals definiert als Zeitraum zwischen den Zeitpunkten, an denen 5 und 95% der Pollenjahressumme erreicht sind.
Pollentransportklimatologie	Der Begriff „Klimatologie“ bedeutet in diesem Zusammenhang, den mittleren Transport der Pollen sowie die Variabilität in Zeit und Raum.
posttranslationale (Protein-)Modifikationen	sind Veränderungen von Proteinen, die nach der Synthese von Proteinen in den Zellen lebender Organismen (=Translation) stattfinden.
RCP 2.6	Repräsentativer Konzentrations-Pfad (representative concentration pathway), Beschreibung eines möglichen Klimawandelszenarios unter Annahme von: 400 ppm CO ₂ Äquivalenten und 2.6 W/m ² , etwa gleichbleibende Bedingungen, mit einem Anstieg der globalen Mitteltemperatur bis 2100 von <2 Grad Celsius (niedrig)
RCP 4.5	Repräsentativer Konzentrations-Pfad (representative concentration pathway), Beschreibung eines möglichen Klimawandelszenarios unter Annahme von: 650 ppm CO ₂ Äquivalenten und 4,5 W/m ² , mit einem Anstieg der globalen Mitteltemperatur bis 2100 von 2,6 Grad Celsius (mittel)
RCP 8.5	Repräsentativer Konzentrations-Pfad (representative concentration pathway), Beschreibung eines möglichen Klimawandelszenarios unter Annahme von: 1370 ppm CO ₂ Äquivalenten und 8,5 W/m ² , mit einem Anstieg der globalen Mitteltemperatur bis 2100 von 4.8 Grad Celsius (sehr hoch)
rekombinantes Protein	rekombinante Proteine sind biotechnologisch hergestellte Proteine, die mit Hilfe von gentechnisch veränderten Organismen in unserem Fall im Bakterium Escherichia coli erzeugt wurden. In TP3 wurde die Technik benutzt um das Protein Amb a 1 herzustellen.
RGV/ha HFF	Kennzahl für die Intensität der Grünlandbewirtschaftung als Verhältnis der Raufutter verzehrenden Großvieheinheiten zu einem Hektar Hauptfutterfläche (HFF). 1,4 RGV/ha HFF grenzt z.B. die extensive Grünlandwirtschaft von intensiveren Wirtschaftsformen ab.
Rückwärtstrajektorien	Der DWD definiert Rückwärtstrajektorien als „Trajektorien beschreiben den Pfad des Schwerpunktes eines Luftpaketes durch die Atmosphäre. Sie ermöglichen Aussagen über die Transportrichtung zum

Beispiel von Verunreinigungen im Luftpaket, Schadstoffkonzentrationen werden nicht ermittelt. Vorwärtstrajektorien geben an, wohin sich ein Luftpaket bewegt (zum Beispiel mit Start von einem europäischen Kernkraftwerk), Rückwärtstrajektorien dagegen, woher es kommt (zum Beispiel mit Ankunft/Ziel an einer Pollenmessstation. (https://www.dwd.de/DE/forschung/wettervorhersage/num_modellierung/03_umweltvorhersage/trajektorien.html).

RGV	Raufutterverzehrende Großvieheinheit
Seneszenz	ist bei Pflanzen ein genetisch gesteuerter und energieabhängiger Alterungsprozess
Serum	Blutbestandteil, der keine Blutkörperchen mehr enthält, jedoch noch Antikörper. Seren von Allergikern enthalten Antikörper gegen die entsprechenden Allergene und können so zu deren Nachweis verwendet werden.
Spezifischer Einflussfaktor	Hier speziell für die Untersuchungen in TP1 einer der Faktoren, die den Pollenflug am Messort beeinflussen. Dieser Faktor ist oft der wichtigste und repräsentiert das Pflanzenvorkommen. Es beschreibt das Verhältnis zwischen Speziesvorkommen und Pollenflug.
StMUV	Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz
Vollblüte	Vollblüte der Gräser ist laut Deutscher Wetterdienst (DWD), der Zeitpunkt, an dem etwa die Hälfte der am Wuchsort der Gräser vorhandenen Blüten geöffnet sind und große Mengen Blütenstaub abgeben.

10 Literaturverzeichnis

1. BayrischesStaatsministeriumfürUmweltundVerbraucherschutz(StMUV) (2015) Klimaschutzprogramm Bayern 2050.
2. IPCC2014, R.K. Pachauri, L.A. Meyer, (Hrsg.) (2016) IPCC, 2014: Klimaänderung 2014: Synthesebericht. Beitrag der Arbeitsgruppen I, II und III zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC). IPCC, Genf, Schweiz. Deutsche Übersetzung durch Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Bonn.
3. Kohlhuber, M.B., F.; Schindler, P.; Höller, C.; Beck, H.; Weber, H.; Fromme, H. (2006) Klimaveränderung in Bayern - Gesundheitliche Folgen und Perspektiven. Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit.
4. Haftenberger, M., D. Laussmann, U. Ellert, M. Kalcklosch, U. Langen, M. Schlaud, R. Schmitz, M. Thamm (2013) Prevalence of sensitisation to aeroallergens and food allergens: results of the German Health Interview and Examination Survey for Adults (DEGS1). Bundesgesundheitsblatt Gesundheitsforschung Gesundheitsschutz 56: 687-97.
5. Durham, S.R., H.S. Nelson, H. Nolte, D.I. Bernstein, P.S. Creticos, Z. Li, J.S. Andersen (2014) Magnitude of efficacy measurements in grass allergy immunotherapy trials is highly dependent on pollen exposure. Allergy 69: 617-23.
6. Ewert, T. (2015) Gesundheitsökonomische und arbeitsökonomische Kosten der Pollenallergie in Bayern. Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit Aktenzeichen GE6-2495-06-V63-D23788/2015.
7. Buters, J., M. Prank, M. Sofiev, G. Pusch, R. Albertini, I. Annesi-Maesano, C. Antunes, H. Behrendt, U. Berger, R. Brandao, S. Celenk, C. Galan, L. Grewlinh, B. Jackowiak, R. Kennedy, A. Rantio-Lehtimaaki, G. Reese, I. Sailine, M. Smith, M. Thibaudon, B. Weber, L. Cecchi (2015) Variation of the group 5 grass pollen allergen content of airborne pollen in relation to geographical location and time in season. J Allergy Clin Immunol 136: 87-95.
8. Lake, I.R., N.R. Jones, M. Agnew, C.M. Goodess, F. Giorgi, L. Hamaoui-Laguél, M.A. Semenov, F. Solomon, J. Storkey, R. Vautard, M.M. Epstein (2016) Climate Change and Future Pollen Allergy in Europe. Environ Health Perspect, DOI: 10.1289/EHP173.
9. Jochner, S., C. Ziello, A. Bock, N. Estrella, J. Buters, I. Weichenmeier, H. Behrendt, A. Menzel (2012) Spatio-temporal investigation of flowering dates and pollen counts in the topographically complex Zugspitze area on the German-Austrian border. Aerobiologia 28: 541-556.
10. Simoleit, A., R. Wachter, U. Gauger, M. Werchan, B. Werchan, T. Zuberbier, K. Bergmann (2016) Pollen season of European beech (*Fagus sylvatica* L.) and temperature trends at two German monitoring sites over a more than 30-year period. Aerobiologia DOI 10.1007/s10453-016-9421-y.
11. Höflich, C., G. Balakirski, Z. Hajdu, J.M. Baron, L. Kaiser, K. Czaja, H.F. Merk, S. Gerdson, U. Strassen, M. Bas, H. Bier, W. Dott, H.G. Mucke, W. Straff, A. Chaker, S. Roseler (2016) Potential health risk of allergenic pollen with climate change associated spreading capacity: Ragweed and olive sensitization in two German federal states. Int J Hyg Environ Health 219: 252-60.

12. Richter, R., U. Berger, S. Dullinger, F. Essl, M. Leitner, M. Smith, G. Vogl (2013) Spread of invasive ragweed: climate change, management and how to reduce allergy costs. *J Appl Ecol* 50: 1422-1430.
13. D'Amato, G., H.J. Chong-Neto, O.P. Monge Ortega, C. Vitale, I. Ansotegui, N. Rosario, T. Haahtela, C. Galan, R. Pawankar, M. Murrieta-Aguttes, L. Cecchi, C. Bergmann, E. Ridolo, G. Ramon, S. Gonzalez Diaz, M. D'Amato, I. Annesi-Maesano (2020) The effects of climate change on respiratory allergy and asthma induced by pollen and mold allergens. *Allergy* 75: 2219-2228.
14. Jochner, S., A. Menzel (2015) Urban phenological studies – Past, present, future. *Environmental Pollution* 203: 250-261.
15. Beggs, P. (2016) Impacts of climate change on allergens and allergic diseases. Vol. Impacts of climate change on allergens and allergic disease: Cambridge Press.
16. Rosenzweig, C., D. Karoly, M. Vicarelli, P. Neofotis, Q. Wu, G. Casassa, A. Menzel, T.L. Root, N. Estrella, B. Seguin, P. Tryjanowski, C. Liu, S. Rawlins, A. Imeson (2008) Attributing physical and biological impacts to anthropogenic climate change. *Nature* 453: 353-357.
17. Ziello, C., T.H. Sparks, N. Estrella, J. Belmonte, K.C. Bergmann, E. Bucher, M.A. Brighetti, A. Damialis, M. Detandt, C. Galan, R. Gehrig, L. Grewling, A.M. Gutierrez Bustillo, M. Hallsdottir, M.C. Kockhans-Bieda, C. De Linares, D. Myszkowska, A. Paldy, A. Sanchez, M. Smith, M. Thibaudon, A. Travaglini, A. Uruska, R.M. Valencia-Barrera, D. Vokou, R. Wachter, L.A. de Weger, A. Menzel (2012) Changes to airborne pollen counts across Europe. *PLoS One* 7: e34076.
18. Fu, Y.H., H. Zhao, S. Piao, M. Peaucelle, S. Peng, G. Zhou, P. Ciais, M. Huang, A. Menzel, J. Penuelas, Y. Song, Y. Vitasse, Z. Zeng, I.A. Janssens (2015) Declining global warming effects on the phenology of spring leaf unfolding. *Nature* 526: 104-7.
19. Matiu, M., D.P. Ankerst, A. Menzel (2016) Asymmetric trends in seasonal temperature variability in instrumental records from ten stations in Switzerland, Germany and the UK from 1864 to 2012. *Int J Climatol* 36: 13-27.
20. Bock, A., T.H. Sparks, N. Estrella, A. Menzel (2013) Changes in the timing of hay cutting in Germany do not keep pace with climate warming. *Global Change Biology* 19: 3123-3132.
21. Beck, I., S. Jochner, S. Gilles, M. McIntyre, J.T. Buters, C. Schmidt-Weber, H. Behrendt, J. Ring, A. Menzel, C. Traidl-Hoffmann (2013) High environmental ozone levels lead to enhanced allergenicity of birch pollen. *PLoS One* 8: e80147.
22. Zhao, F., A. Elkelish, J. Durner, C. Lindermayr, J.B. Winkler, F. Ruëff, H. Behrendt, C. Traidl-Hoffmann, A. Holzinger, W. Kofler, P. Braun, C. von Toerne, S.M. Hauck, D. Ernst, U. Frank (2016) Common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.): allergenicity and molecular characterization of pollen after plant exposure to elevated NO₂. *Plant, Cell & Environment* 39: 147-164.
23. Oeder, S., F. Alessandrini, O.F. Wirz, A. Braun, M. Wimmer, U. Frank, M. Hauser, J. Durner, F. Ferreira, D. Ernst, M. Mempel, S. Gilles, J.T. Buters, H. Behrendt, C. Traidl-Hoffmann, C. Schmidt-Weber, M. Akdis, J. Gutermuth (2015) Pollen-derived nonallergenic substances enhance Th2-induced IgE production in B cells. *Allergy* 70: 1450-60.

24. Gilles, S., V. Mariani, M. Bryce, M.J. Mueller, J. Ring, H. Behrendt, T. Jakob, C. Traidl-Hoffmann (2009) Pollen allergens do not come alone: pollen associated lipid mediators (PALMS) shift the human immune systems towards a TH 2-dominated response. *Allergy, Asthma & Clinical Immunology* 5: 3.
25. Hoffmann-Sommergruber, K. (2002) Pathogenesis-related (PR)-proteins identified as allergens. 2002, Portland Press Limited.
26. Bergmann, K.-C. (2016) Weather conditions and climate change have an effect on allergies. *Allergo J Int* 25: 131-137.
27. Buters, J. (2016) Chapter 5. Impacts of Climate Change on Allergenicity, in *Impacts of climate change on allergens and allergic disease*, P. Beggs, Editor. Cambridge University Press.
28. von Groote-Bidlingmaier, C., K. Hilbert, J. Schwer, S. Timpf (2015) Interactive WebGIS for Archaeological Settlement Pattern Analysis—A Requirement Analysis. 27th International Cartographic Conference (ICC), Rio de Janeiro, DOI: http://icaci.org/files/documents/ICC_proceedings/ICC2015/papers/33/fullpaper/T33-1009_1428677938.pdf.
29. Estrella, N., A. Menzel, U. Kramer, H. Behrendt (2006) Integration of flowering dates in phenology and pollen counts in aerobiology: analysis of their spatial and temporal coherence in Germany (1992-1999). *International Journal of Biometeorology* 51: 49-59.
30. Laube, J., T.H. Sparks, N. Estrella, J. Hofler, D.P. Ankerst, A. Menzel (2014) Chilling outweighs photoperiod in preventing precocious spring development. *Global Change Biology* 20: 170-82.
31. Matiu, M., D.P. Ankerst, A. Menzel (2017) Interactions between temperature and drought in global and regional crop yield variability during 1961-2014. *Plos One* 12: e0178339.
32. El Kelish, A., F. Zhao, W. Heller, J. Durner, J. Winkler, H. Behrendt, C. Traidl-Hoffmann, R. Horres, M. Pfeifer, U. Frank, D. Ernst (2014) Ragweed (*Ambrosia artemisiifolia*) pollen allergenicity: SuperSAGE transcriptomic analysis upon elevated CO₂ and drought stress. *BMC Plant Biology* 14: 176.
33. Kanter, U., W. Heller, J. Durner, J.B. Winkler, M. Engel, H. Behrendt, A. Holzinger, P. Braun, M. Hauser, F. Ferreira, K. Mayer, M. Pfeifer, D. Ernst (2013) Molecular and immunological characterization of ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.) pollen after exposure of the plants to elevated ozone over a whole growing season. *PLoS One* 8: e61518.
34. Zhao, F., J. Durner, J.B. Winkler, C. Traidl-Hoffmann, T.M. Strom, D. Ernst, U. Frank (2017) Pollen of common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.): Illumina-based de novo sequencing and differential transcript expression upon elevated NO₂/O₃. *Environmental Pollution* 224: 503-514.
35. Rojo, J., A. Picornell, J. Oteros, M. Werchan, B. Werchan, K.-C. Bergmann, M. Smith, I. Weichenmeier, C.B. Schmidt-Weber, J. Buters (2021) Consequences of climate change on airborne pollen in Bavaria, Central Europe. *Regional Environmental Change* 21: 9.
36. Hirst, J.M. (1952) An Automatic Volumetric Spore Trap. *Annals of Applied Biology* 39: 257-265.
37. Oteros, J., M. Sofiev, M. Smith, B. Clot, A. Damialis, M. Prank, M. Werchan, R. Wachter, A. Weber, S. Kutzora (2019) Building an automatic pollen monitoring network (ePIN):

- Selection of optimal sites by clustering pollen stations. *Science of the Total Environment* 688: 1263-1274.
38. Galán, C., M. Smith, M. Thibaudon, G. Frenguelli, J. Oteros, R. Gehrig, U. Berger, B. Clot, R. Brandao, E.Q.W. Group (2014) Pollen monitoring: minimum requirements and reproducibility of analysis. *Aerobiologia* 30: 385-395.
 39. DIN_CEN/TS-16868 (2015) Ambient air. Sampling and analysis of airborne pollen grains and fungal spores for allergy networks. Volumetric Hirst method CEN.
 40. Pfaar, O., K. Bastl, U. Berger, J. Buters, M.A. Calderon, B. Clot, U. Darsow, P. Demoly, S.R. Durham, C. Galan, R. Gehrig, R. Gerth van Wijk, L. Jacobsen, L. Klimek, M. Sofiev, M. Thibaudon, K.C. Bergmann (2017) Defining pollen exposure times for clinical trials of allergen immunotherapy for pollen-induced rhinoconjunctivitis - an EAACI position paper. *Allergy* 72: 713-722.
 41. Andersen, T.B. (1991) A model to predict the beginning of the pollen season. *Grana* 30: 269-275.
 42. Rojo, J., A. Picornell, J. Oteros (2019) AeRobiology: the computational tool for biological data in the air. *Methods in Ecology and Evolution*.
 43. Karatzas, K., D. Voukantsis, S. Jaeger, U. Berger, M. Smith, O. Brandt, T. Zuberbier, K.C. Bergmann (2014) The patient's hay-fever diary: three years of results from Germany. *Aerobiologia* 30: 1-11.
 44. Picornell, A., J. Buters, J. Rojo, C. Traidl-Hoffmann, A. Menzel, K. Bergmann, M. Werchan, C. Schmidt-Weber, J. Oteros (2019) Predicting the start, peak and end of the *Betula* pollen season in Bavaria, Germany. *Science of The Total Environment* 690: 1299-1309.
 45. De Rigo, D., G. Caudullo, T. Houston Durrant, J. San-Miguel-Ayanz (2016) The European Atlas of Forest Tree Species: modelling, data and information on forest tree species. *European Atlas of Forest Tree Species*: e01aa69+.
 46. Sanderson, E.W., M. Jaiteh, M.A. Levy, K.H. Redford, A.V. Wannebo, G. Woolmer (2002) The human footprint and the last of the wild. *BioScience* 52: 891-904.
 47. Wildlife Conservation Society - WCS, Center for International Earth Science Information Network - CIESIN - Columbia University (2005) Last of the Wild Project, Version 2, 2005 (LWP-2): Global Human Footprint Dataset (Geographic). 2005, NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC): Palisades, NY.
 48. Fick, S.E., R.J. Hijmans (2017) WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 37: 4302-4315.
 49. Chen, M., C.R. Vernon, N.T. Graham, M. Hejazi, M. Huang, Y. Cheng, K. Calvin (2020) Global land use for 2015-2100 at 0.05° resolution under diverse socioeconomic and climate scenarios. *Scientific Data* 7: 320.
 50. Ribeiro, E., N. Batjes, A. Van Oostrum (2018) World Soil Information Service (WoSIS)-Towards the standardization and harmonization of world soil data. *Procedures manual*.
 51. Cornes, R.C., G. van der Schrier, E.J.M. van den Besselaar, P.D. Jones (2018) An Ensemble Version of the E-OBS Temperature and Precipitation Data Sets. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 123: 9391-9409.
 52. Galán, C., A. Ariatti, M. Bonini, B. Clot, B. Crouzy, A. Dahl, D. Fernandez-González, G. Frenguelli, R. Gehrig, S. Isard, E. Levetin, D.W. Li, P. Mandrioli, C.A. Rogers, M.

- Thibaudon, I. Sauliene, C. Skjoth, M. Smith, M. Sofiev (2017) Recommended terminology for aerobiological studies. *Aerobiologia* 33: 293-295.
53. Hufkens, K., D. Basler, T. Milliman, E.K. Melaas, A.D. Richardson (2018) An integrated phenology modelling framework in R. *Methods in Ecology and Evolution* 9: 1276-1285.
54. Oteros, J., H. Garcia-Mozo, P. Alcazar, J. Belmonte, D. Bermejo, M. Boi, P. Carinanos, C. Diaz de la Guardia, D. Fernandez-Gonzalez, F. Gonzalez-Minero, A.M. Gutierrez-Bustillo, S. Moreno-Grau, R. Perez-Badia, F.J. Rodriguez-Rajo, L. Ruiz-Valenzuela, J. Suarez-Perez, M.M. Trigo, E. Dominguez-Vilches, C. Galan (2015) A new method for determining the sources of airborne particles. *J Environ Manage* 155: 212-8.
55. Oteros, J., R.M. Valencia, S. Del Río, A.M. Vega, H. García-Mozo, C. Galán, P. Gutiérrez, P. Mandrioli, D. Fernández-González (2017) Concentric Ring Method for generating pollen maps. Quercus as case study. *Science of the Total Environment* 576: 637-645.
56. Rojo, J., F. Orlandi, R. Pérez-Badia, F. Aguilera, A.B. Dhiab, H. Bouziane, C.D. de la Guardia, C. Galan, A. Gutiérrez-Bustillo, S. Moreno-Grau (2016) Modeling olive pollen intensity in the Mediterranean region through analysis of emission sources. *Science of the Total Environment* 551: 73-82.
57. Kosanic, A., I. Kavcic, M. van Kleunen, S. Harrison (2019) Climate change and climate change velocity analysis across Germany. *Scientific Reports* 9: 2196.
58. Ziska, L.H., L. Makra, S.K. Harry, N. Bruffaerts, M. Hendrickx, F. Coates, A. Saarto, M. Thibaudon, G. Oliver, A. Damialis, A. Charalampopoulos, D. Vokou, S. Heiðmarsson, E. Gudjohansen, M. Bonini, J.-W. Oh, K. Sullivan, L. Ford, G.D. Brooks, D. Myszkowska, E. Severova, R. Gehrig, G.D. Ramón, P.J. Beggs, K. Knowlton, A.R. Crimmins (2019) Temperature-related changes in airborne allergenic pollen abundance and seasonality across the northern hemisphere: a retrospective data analysis. *The Lancet Planetary Health* 3: e124-e131.
59. Gehrig, R., B. Clot (2021) 50 Years of Pollen Monitoring in Basel (Switzerland) Demonstrate the Influence of Climate Change on Airborne Pollen. *Frontiers in Allergy*, 2DOI: 10.3389/falgy.2021.677159.
60. Dyderski, M.K., S. Paż, L.E. Frelich, A.M. Jagodziński (2018) How much does climate change threaten European forest tree species distributions? *Global Change Biology* 24: 1150-1163.
61. Leuschner, C., H. Ellenberg (2017) Ecology of central European forests: Vegetation ecology of Central Europe, volume I. Vol. 1: Springer.
62. Steckling-Muschack, N., H. Mertes, I. Mittermeier, P. Schutzmeier, J. Becker, K.-C. Bergmann, S. Böse-O'Reilly, J. Buters, A. Damialis, J. Heinrich, M. Kabesch, D. Nowak, S. Walser-Reichenbach, A. Weinberger, M. Zamfir, C. Herr, S. Kutzora, S. Heinze (2021) A systematic review of threshold values of pollen concentrations for symptoms of allergy. *Aerobiologia*, DOI: 10.1007/s10453-021-09709-4.
63. Menzel, A., H. Ghasemifard, Y. Yuan, N. Estrella (2021) A First Pre-season Pollen Transport Climatology to Bavaria, Germany. *Frontiers in Allergy*, 2DOI: 10.3389/falgy.2021.627863.
64. Nilsson, S., S. Persson (1981) Tree pollen spectra in the Stockholm region (Sweden), 1973–1980. *Grana* 20: 179-182.

65. Yuan, Y., S. Härer, T. Ottenheim, G. Misra, A. Lüpke, N. Estrella, A. Menzel (2021) Maps, trends, and temperature sensitivities—phenological information from and for decreasing numbers of volunteer observers. *International Journal of Biometeorology*, DOI: 10.1007/s00484-021-02110-3.
66. Menzel, A., T.H. Sparks, N. Estrella, S. Eckhardt (2005) 'SSW to NNE'— North Atlantic Oscillation affects the progress of seasons across Europe. *Global Change Biology* 11: 909-918.
67. Ghasemifard, H., W. Ghada, N. Estrella, M. Lüpke, J. Oteros, C. Traidl-Hoffmann, A. Damialis, J. Buters, A. Menzel (2020) High post-season *Alnus* pollen loads successfully identified as long-range transport of an alpine species. *Atmospheric Environment* 231: 117453.
68. Rojo, J., J. Oteros, R. Pérez-Badia, P. Cervigón, Z. Ferencova, A.M. Gutiérrez-Bustillo, K.-C. Bergmann, G. Oliver, M. Thibaudon, R. Albertini, D. Rodríguez-De la Cruz, E. Sánchez-Reyes, J. Sánchez-Sánchez, A.-M. Pessi, J. Reiniharju, A. Saarto, M.C. Calderón, C. Guerrero, D. Berra, M. Bonini, E. Chiodini, D. Fernández-González, J. García, M.M. Trigo, D. Myszkowska, S. Fernández-Rodríguez, R. Tormo-Molina, A. Damialis, F. Kolek, C. Traidl-Hoffmann, E. Severova, E. Caeiro, H. Ribeiro, D. Magyar, L. Makra, O. Udvardy, P. Alcázar, C. Galán, K. Borycka, I. Kasprzyk, E. Newbiggin, B. Adams-Groom, G.P. Apangu, C.A. Frisk, C.A. Skjøth, P. Radišić, B. Šikoparija, S. Celenk, C.B. Schmidt-Weber, J. Buters (2019) Near-ground effect of height on pollen exposure. *Environmental Research* 174: 160-169.
69. Jung, S., N. Estrella, M.W. Pfaffl, S. Hartmann, E. Handelshäuser, A. Menzel (2018) Grass pollen production and group V allergen content of agriculturally relevant species and cultivars. *PLOS ONE* 13: e0193958.
70. Menzel, A. (2019) The allergen riddle. *Nature Ecology & Evolution* 3: 716-717.
71. Jung, S., Y. Yuan, M. Stange Del Carpio, T. Pawlik, S. Hartmann, N. Estrella, J. Oteros, C. Traidl-Hoffmann, A. Damialis, J. Buters, A. Menzel (eingereicht) Impact of local grassland sources on grass pollen (*Poaceae*) emission in Bavaria, Germany. *Scientific Reports*.
72. Kuhn, G., S. Heinz, F. Mayer (2011) Grünlandmonitoring Bayern: Ersterhebung der Vegetation 2002-2008. LfL.
73. Menzel, A., Y. Yuan, A. Hamann, U. Ohl, M. Matiu (2020) Chilling and Forcing From Cut Twigs—How to Simplify Phenological Experiments for Citizen Science. *Frontiers in Plant Science* 11.
74. Jung, S., F. Zhao, A. Menzel (2021) Establishing the twig method for investigations on pollen characteristics of allergenic tree species. *International Journal of Biometeorology*, DOI: 10.1007/s00484-021-02154-5.
75. Bradford, M.M. (1976) A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry* 72: 248-254.
76. Meier, U. (2001) Entwicklungsstadien mono-und dikotyle Pflanzen. Die erweiterte BBCH Monographie 2.
77. Buters, J.T.M., A. Kasche, I. Weichenmeier, W. Schober, S. Klaus, C. Traidl-Hoffmann, A. Menzel, J. Huss-Marp, U. Krämer, H. Behrendt (2008) Year-to-year variation in release of Bet v 1 allergen from birch pollen: Evidence for geographical differences

- between West and South Germany. *International Archives of Allergy and Immunology* 145: 122-130.
78. Bacsi, A., N. Dharajiya, B.K. Choudhury, S. Sur, I. Boldogh (2005) Effect of pollen-mediated oxidative stress on immediate hypersensitivity reactions and late-phase inflammation in allergic conjunctivitis. *Journal of Allergy and Clinical Immunology* 116: 836-843.
79. Boldogh, I., A. Bacsi, B.K. Choudhury, N. Dharajiya, R. Alam, T.K. Hazra, S. Mitra, R.M. Goldblum, S. Sur (2005) ROS generated by pollen NADPH oxidase provide a signal that augments antigen-induced allergic airway inflammation. *Journal of Clinical Investigation* 115: 2169-2179.
80. Holzmeister, C., A. Fröhlich, H. Sarioglu, N. Bauer, J. Durner, C. Lindermayr (2011) Proteomic analysis of defense response of wildtype *Arabidopsis thaliana* and plants with impaired NO- homeostasis. *Proteomics* 11: 1664-1683.
81. Pazzaglia, S., B. Tanno, F. Antonelli, P. Giardullo, G. Babini, P. Subedi, O. Azimzadeh, Z.N. Khan, K. Oleksenko, F. Metzger, C.V. Toerne, D. Traynor, D. Medipally, A.D. Meade, M. Kadhim, F.M. Lyng, S. Tapio, A. Saran, M. Mancuso (2021) Out-of-Field Hippocampus from Partial-Body Irradiated Mice Displays Changes in Multi-Omics Profile and Defects in Neurogenesis. *Int J Mol Sci* 22.
82. Pękal, A., K. Pyrzynska (2014) Evaluation of aluminium complexation reaction for flavonoid content assay. *Food Analytical Methods* 7: 1776-1782.
83. Karle, A.C., G.J. Oostingh, S. Mutschlechner, F. Ferreira, P. Lackner, B. Bohle, G.F. Fischer, A.B. Vogt, A. Duschl (2012) Nitration of the pollen allergen Bet v 1.0101 enhances the presentation of Bet v 1-derived peptides by HLA-DR on human dendritic cells. *PLoS ONE* 7: e31483.
84. Ackaert, C., S. Kofler, J. Horejs-Hoeck, N. Zulehner, C. Asam, S. von Grafenstein, J.E. Fuchs, P. Briza, K.R. Liedl, B. Bohle, F. Ferreira, H. Brandstetter, G.J. Oostingh, A. Duschl (2014) The impact of nitration on the structure and immunogenicity of the major birch pollen allergen Bet v 1.0101. *PLoS ONE* 9: e104520.
85. Gentili, R., R. Asero, S. Caronni, M. Guarino, C. Montagnani, G. Mistrello, S. Citterio (2019) *Ambrosia artemisiifolia* L. temperature-responsive traits influencing the prevalence and severity of pollinosis: a study in controlled conditions. *BMC Plant Biology* 19: 155.
86. StMUG (2009) Klimaprogramm Bayern 2020. Bayerische Staatsregierung Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit (StMUG)
87. BayerischesStaatsministeriumfürUmweltundVerbraucherschutz, ed. (2016) Bayerische Klima-Anpassungsstrategie, Ausgabe 2016. 218.

11 Anlagen

11.1 Liste der Pollenmessstationen

Lfd. Nr.	Abkürzung	Ort
1	DEALTO	Altötting
2	DEAUGS	Augsburg
3	DEBAMB	Bamberg
4	DEBAYR	Bayreuth
5	DEBERC	Berchtesgaden
6	DEBIED	München Biederstein
7	DEDONA	Donaustauf
8	DEERLA	Erlangen
9	DEFEUC	Feucht
10	DEGAIS	Gaisach
11	DEGARM	Garmisch-Partenkirchen
12	DEHOF	Hof
13	DEKITZ	Kitzingen
14	DEKOES	Kösching
15	DELANDS	Landshut
16	DEMARK	Marktheidenfeld
17	DEMIND	Mindelheim
18	DEMUNC	München Thalkirchnerstrasse
19	DEMUST	Münnerstadt
20	DEOETT	Öttingen
21	DEPASS	Passau
22	DEPFRO	Pfronten
23	DETROS	Trostberg
24	DEUFS2	Schneefernerhaus
25	DEVIEC	Viechtach
26	DEWEID	Weiden
27	DEZUSM	Zusmarshausen

11.2 Meilensteine

(lt. Bewilligungsschreiben vom 18.07.2018)

Teilprojekt 1

- M1 Erstellung gemeinsamer Bedingungen
- M2 Zukünftige klimatische Karten für Bayern
- M3 Quellkarten pro Spezies für heute und in der Zukunft
- M4 Luftreinheitskarten und Projektionen
- M5 Modell für 3 phänologische Parameter (Start-, Peak-, Enddatum) für jede Spezies
- M6 Modelle für 7 Intensitätsparameter für jede Spezies
- M7 Kalibrierte phänologische Modelle
- M8 Projektion der Pollenphänologie und Intensität für jede Pollenspezies für jeden Ort für Perioden bis 2075
- M9 Projektionen (München, Bamberg, Münnerstadt, Oberjoch) für die interaktive Karte
- M10 Allergie-Symptomkurven für jeden Ort und Periode bis 2075 in Bayern (minimal Birke, Gräser, Esche)
- Extern M1 Beschreibung des Klimawandels in Bayern bis heute
- Extern M2 Vorhersage München, Bamberg, Münnerstadt, Oberjoch
- Extern M3 Vergleich PID Vorhersage mit modellierter Vorhersage
- Extern M4 Pollen-Dosis-Effekt-Kurve (d.h. Pollen-Effekt-Kurve) für Bayern
- Extern M5 Infrastruktur erstellt, Programmierung der interaktiven Karte
- Extern M 6 Funktionalität getestet, Internet-basierte interaktive Karte mit Parametern aller Teilprojekte

Teilprojekt 2

- M11 Klimatologien und Modelle für die wichtigen Pollenarten
- M12 Darstellung der Graspollenrelevanten Landnutzungsänderungen
- M13 Klimasensitivitäten von Zeitpunkten, Modellmengen und Allergenität holziger Pflanzen
- Extern M7 Ableitung von Graspollenrelevanten landwirtschaftlichen Nutzungs- und Bewirtschaftungsänderungen (LfL)

Teilprojekt 3

- M14.1 Gewinnung der zu untersuchenden Birkenpollen

- M14.2 Erhebung der phänologischen Blühdaten, Gewinnung der zu untersuchenden Pollen (Birke)
- M14.3 Erhebung der phänologischen Blühdaten, Gewinnung der zu untersuchenden Pollen (Birke)
- M15.1 Quantifizierung der Pollenproteine Bestimmung der Gehalte an Allergenen und reaktiven Sauerstoffspezies (Birke)
- M15.2 Quantifizierung der Pollenproteine Bestimmung der Gehalte an Allergenen und reaktiven Sauerstoffspezies (Birke)
- M15.3 Quantifizierung der Pollenproteine Bestimmung der Gehalte an Allergenen und reaktiven Sauerstoffspezies (Birke)
- M16.1 Parameter zu Wachstum, Blühstadien und Pollenfreisetzung werden erhoben (*Ambrosia* München)
- M16.2 Parameter zu Wachstum, Blühstadien und Pollenfreisetzung werden erhoben (*Ambrosia* Würzburg)
- M17.1 Pollen werden eingehend biochemisch und immunologisch untersucht (*Ambrosia* München)
- M17.2 Pollen werden eingehend biochemisch und immunologisch untersucht (*Ambrosia* Würzburg)
- M18 Mit Hilfe humaner Seren mit entsprechender Sensibilisierung werden Pollenallergene aufgezeigt und Allergengehalte (in Versuch M13, TP 2)
- Extern M8 Randbedingungen für alle Klimakammerexperimente* sind festgelegt

*ad Extern M8: Unter „Klimakammerexperimente“ (siehe auch Glossar) waren in Extern M8 - im Antrag sprachlich ungenau - die Experimente in klimaregulierbaren Phytotronen gemeint, denn nur in diesen war eine genaue Temperaturprogrammierung und kontrollierte Gasatmosphäre möglich.

11.3 Publikationen in Fachzeitschriften

11.3.1 Öffentlich frei verfügbare Publikationen (open access)

Jung S, Zhao F, Menzel A (2021) Establishing the twig method for investigations on pollen characteristics of allergenic tree species. *International Journal of Biometeorology (online May 27th)* 1-11 (doi: 10.1007/s00484-021-02154-5 und als open access online Publikation unter <https://link.springer.com/article/10.1007/s00484-021-02154-5>).

Menzel A, Ghasemifard H, Yuan Y, Estrella N (2021) A first pre-season pollen transport climatology to Bavaria, Germany. *Frontiers in Allergy* **2**, 627863 (doi:

10.3389/falgy.2021.627863 und als open access online Publikation unter <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/falgy.2021.627863/full>).

Rojo, J., Oteros, J., Picornell, A., Ruëff, F., Werchan, B., Werchan, M., ... & Buters, J. (2020). Land-use and height of pollen sampling affect pollen exposure in Munich, Germany. *Atmosphere*, 11(2), 145 (<https://doi.org/10.3390/atmos11020145>).

11.3.2 Öffentlich nicht frei verfügbare Publikationen

(Pdfs nur für nicht-öffentlichen Gebrauch beigelegt unter Kapitel 12)

Ghasemifard H, Ghada W, Estrella N, Lüpke M, Oteros J, Traidl-Hoffmann C, Damialis A, Buters J, Menzel A (2020) High post-season *Alnus* pollen loads successfully identified as long-range transport of an alpine species. *Atmospheric Environment* **231**, 117453 (doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117453, pdf der Publikation dem Abschlussbericht beigelegt, da nicht open access).

Jung S, Yuan Y, Stange del Caprio M, Pawlik T, Hartmann S, Estrella N, Oteros J, Traidl-Hoffmann C., Damialis A, Buters J, Menzel A (2021) Impact of local grassland sources on wild grass pollen emission in Bavaria, Germany. *Scientific Reports (re-submitted Sept 12th 2021*, pdf der resubmittierten Version dem Abschlussbericht beigelegt, da noch nicht veröffentlicht).

Picornell, A., Buters, J., Rojo, J., Traidl-Hoffmann, C., Damialis, A., Menzel, A., ... & Oteros, J. (2019). Predicting the start, peak, and end of the *Betula* pollen season in Bavaria, Germany. *Science of the Total Environment*, 690, 1299-1309.

Rojo, J., Oteros, J., Picornell, A., Maya-Manzano, J., Damialis, A., Zink, K., Werchan, M., Werchan, B., Smith, M., Menzel, A., Traidl-Hoffmann, C., Bergmann, K.-C., Schmidt-Weber, C. & Buters, J. (2021). Effects of future climate change on birch abundance and their pollen load. *Global Change Biology* (accepted August 2021).

Rojo, J., Picornell, A., Oteros, J., Werchan, M., Werchan, B., Bergmann, K. C., ... & Buters, J. (2021). Consequences of climate change on airborne pollen in Bavaria, Central Europe. *Regional Environmental Change*, 21(1), 1-13.

11.3.3 Veröffentlichungen in Vorbereitung

(voraussichtlich verfügbar im Rahmen des fälligen Berichts 1 Jahr nach Abschluss des Projekts)

Oteros, J., Rojo, J., Maya-Manzano, J., Picornell, A., Damialis, A., Zink, K., Werchan, M., Werchan, B., Smith, M., Menzel, A., Traidl-Hoffmann, C., Bergmann, K.-C., Schmidt-Weber, C. & Buters, J. (*in Vorbereitung*). Modelling birch and grass reproductive phenology in central Europe.

Cheng, X., Zhao, F., Frank, U., Weikl, F., Ruiz-Capella, J., Ghirardo, A., Buters, J., Durner, J. & Pritsch, K. (*in Vorbereitung*): Experimentally simulated current and future temperatures and NO₂ concentrations alter plant growth and pollen allergenic potential of *Ambrosia artemisiifolia*.

Cheng, X., Frank, U., Zhao, F., Durner, J., Pritsch, K. (in Vorbereitung). In-depth proteomic analysis of ragweed (*Ambrosia artemisiifolia*) pollen reveals temperature and NO₂ effects on allergen composition.

Frank, U., Zhao, F., Cheng, X., Winkler, J.B., Buters, J., Durner, J. & Pritsch, K. (in Vorbereitung): Experimental evidence that previous year spring elevated temperature influences pollen production but not allergenicity of birch (*Betula pendula*).

11.3.4 Weitere Veröffentlichungen - indirekte Resultate

Bergmann, K. C., Buters, J., Karatzas, K., Tasioulis, T., Werchan, B., Werchan, M., & Pfaar, O. (2020). The development of birch pollen seasons over 30 years in Munich, Germany—An EAACI Task Force report. *Allergy*, 75(12), 3024-3026.

Jung HS, Estrella N, Pfaffl MW, Hartmann S, Ewald F, Menzel A (2021) Impact of elevated air temperature and drought on pollen characteristics of major agricultural grass species. *PLOS ONE* **16(3)**, e0248759 (doi: 10.1371/journal.pone.0248759).

Oteros, J., Bergmann, K. C., Menzel, A., Damialis, A., Traidl-Hoffmann, C., Schmidt-Weber, C. B., & Buters, J. (2019). Spatial interpolation of current airborne pollen concentrations where no monitoring exists. *Atmospheric Environment*, 199, 435-442.

Rojo, J., Oteros, J., Pérez-Badia, R., Cervigón, P., Ferencova, Z., Gutiérrez-Bustillo, A. M., ... & Buters, J. (2019). Near-ground effect of height on pollen exposure. *Environmental research*, 174, 160-169.

Rojo, J., Picornell, A., & Oteros, J. (2019). AeRobiology: The computational tool for biological data in the air. *Methods in Ecology and Evolution*, 10(8), 1371-1376.

11.4 Tagungsbeiträge (Poster, Talks)

Poster 1 & Talk 1 auf Konferenz 7th ESA VIRTUAL SYMPOSIUM - 17.11.2020 Titel: Long-term airborne pollen monitoring in southern Bavaria - Time series analysis with implications for climate and land use (Jung, Yuan, Menzel).

Talk 2 auf Konferenz EGU - 28.04.2021 Titel: The role of land cover, land use, and atmospheric transport for the mismatch of flowering and atmospheric pollen seasonality (Menzel, Yuan)

11.5 Abschlussbericht des externen Partners LfL

(als Pdf beigefügt unter Kapitel 12)

Abschlussbericht der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft zum Meilenstein Extern M7 „Ableitung von Graspollenrelevanten landwirtschaftlichen Nutzungs- und Bewirtschaftungsänderungen“.

**12 PDFs der Veröffentlichungen und Berichte aus Kapitel 11.3
bzw. 11.5**