Welche Veränderungen kann der Klimawandel für Pollenflug und Pollenbelastung allergener Pflanzen bringen?

Das „Wärmejahr“ 2018 in Linz (Oberösterreich) im langjährigen Trend als mögliches Zukunftsmodell

HERWIG AE SCHINKO¹, BERND LAMPRECHT², ROLAND SCHMIDT³

¹Allgemeines Krankenhaus der Stadt Linz, Kepler Universitätsklinikum, Med Campus III, Altenberg/Linz, Österreich;

²Pneumologie, Kepler Universitätsklinikum, Med Campus III, Linz, Österreich; ³Pollenwarndienst Oberösterreich, Mondsee, Österreich

Schlüsselwörter

Klimawandel, allergene Pflanzen, Pollenflug, Belastungsszenarien, Linz (Oberösterreich)

Zusammenfassung

Hintergrund: Global vollzieht sich ein Klimawandel. Pollenallergien nehmen seit Mitte des letzten Jahrhunderts zu. Im Außenraum sorgt die Sensibilisierung gegenüber Pollenallergenen für die höchste Prävalenz von Allergien an Augen und Atemwegen. Daraus ergeben sich folgende Fragen:

1. Wie manifestiert sich der Klimawandel lokal-regional und ist das Temperatur- und Niederschlagsverhalten von 2018 exzeptionell?
2. Wie wirken sich geänderte meteorologische Bedingungen auf Pollenflug und Pollenbelastung aus?

Methoden: Es werden die Pollenflugdaten – bezogen von der Pollenmonitoring-Station Linz, Oberösterreich – der wichtigsten allergenen Pflanzen ausgewertet. Dabei wird das Jahr 2018 den Jahren 1993 bis 2017 gegenübergestellt. Mithilfe statistischer Methoden wird der Einfluss meteorologischer Parameter auf den Pollenflug analysiert.

Ergebnisse: Der Klimawandel ist auch regional nachzuweisen. Das regional gemäßigte Klima verschiebt sich in Richtung wärmere und trockenere (semi-aride) Wetterlagen.

Präseasonale meteorologische Faktoren bestimmen kumulativ Blütenentwicklung, Blüte und Pollenflug (PF). PF-Beginn (PFB) und PF-Dauer von Hasel, Erle, Birke und Gräsern folgen anderen Mechanismen als die saisonale Pollenproduktion (SPIn). Das Modelljahr 2018 bietet durch seinen hybriden Charakter Erklärungen für unterschiedliche Pollenflug- und Belastungsszenarien. Für Hasel (*Corylus*), Erle (*Alnus*) und Birke (*Betula*) ist die

Koinzidenz von kumulierter mittlerer Tageswärme (MTW_{kumul}) und artspezifischer Schwelle der Tageshöchsttemperatur (THT) für den PF-Beginn notwendig. Der früheste war 2018. Frost (MTF_{kumul}) verzögert den PF-Beginn. Präseasonaler Frost beziehungsweise kühle Temperaturen stimulieren die SPIn von Erle und Birke, während die Pollenproduktion der Hasel wärmeabhängig ist. Wärme verlängert die PF-Dauer der Frühblüher. Hitze – kombiniert mit Dürre – verkürzt diese 2018 bei der Birke. Die relative Feuchte (RF) ist hoch signifikant mit dem Blühbeginn der Gräser korreliert. Wärme und Trockenheit führten 2018 zum frühesten PF-Beginn der Gräser seit 1993. Langfristig nehmen ihre SPIn und Haupt-Pollen-Peaks mit der Trockenheit ab.

Schlussfolgerung: Die Annahme, dass die Klimaerwärmung in 26 Jahren zu einer Intensivierung des PF allergener Pflanzen führt, lässt sich für Linz nicht bestätigen. Da die Pollenbelastungen bei Trendanalyse mehrheitlich nicht zu-, sondern abgenommen haben, ist nach anderen Erklärungen für die Zunahme von Pollenallergien und Pollensensibilisierungen zu suchen.

Zitierweise: Schinko HAE, Lamprecht B, Schmidt R. How will climate change alter the dynamics of airborne pollen and pollen load of allergenic plants? The “exceptionally warm year” 2018 in Linz (Upper Austria) – a potential model for the future based on long-term trends. *Allergo J Int* 2021;30:96–108 <https://doi.org/10.1007/s40629-020-00152-4>

Eingang

12. Dezember 2019

Annahme

5. August 2020

Englische Fassung

<https://link.springer.com/journal/40629>

Hintergrund

Pollen zählen zu den wichtigsten Allergen-Carriern im Außenraum. In Österreich hängen Sensibilisierung und Allergie zumindest bei Kindern von der Pollenbelastung ab [1], andererseits wurden in urbanen schadstoffbelasteten Gebieten allergenspezifische IgE bei 37,8 % gegenüber 25,6 % in ländlichen Gebieten gefunden [2]. Bei 501 unselektionierten Jugendlichen im Alter von 12 bis 21 Jahren in Salzburg zeigten rezent 53,5 % eine Sensibilisierung gegenüber Pollenallergenen, 26,5 % gegenüber Phl p 1 (Grasallergen Gruppe 1) und 16,3 % gegenüber Bet v 1 (Hauptallergen der Birke). Die Prävalenz der Pollensensibilisierung betrug 41,7 % und war von Birke und Gras dominiert [3]. Wegen progressiver Klimaerwärmung, beschleunigt seit 1980, und Anstieg des CO₂ in der Luft im vergangenen Jahrhundert von circa 300 auf über 400 ppm (parts per million) wird eine Zunahme der Pollenbelastung erwartet [4]. Vergleiche der Pollenkonzentrationen allergener Pflanzen in der Luft verschiedener Stationen Europas zeigen keinen übereinstimmenden Anstieg [5]. Unterschiedliche Trends bei allergenen Frühblühern und krautigen Sommerblühern (z. B. relativ konstant bei Gräsern, fallend bei Beifuß) tragen zum heterogenen Bild des Einflusses des Klimawandels bei [6]. Die

Analyse des regionalen Klimas und parallel des Pollenflugs allergener Pflanzen – Erle, Hasel, Birke und Gräser – der letzten 25 Jahre in Linz (Oberösterreich) sowie des „Modell-Wärmejahres 2018“ sollten diese Hypothesen überprüfen lassen.

Das Jahr 2018 war nach der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik in Wien (ZAMG) das wärmste Jahr in der 251-jährigen Messgeschichte (seit 1768 lagen von den 20 wärmsten Jahren 14 in den 2000er-Jahren). Es ist charakterisiert durch das höchste Temperatur-Jahresmittel von 12,2 °C mit einer Abweichung von +2,3 °C sowie gleichzeitigem Trockenheitsrekord seit 1852 bei einem Niederschlag von -42 % [7]. Von 1993 bis 2017 sind die Jahresmitteltemperaturen der Tageshöchsttemperatur (THT_jm), Tagesmitteltemperatur (TMT_jm) und Tagestiefsttemperatur (TTT_jm) in Linz progressiv gestiegen. 2018 lagen sie über dem erwarteten Trend, während der Niederschlag über 25 Jahre nicht signifikant zurückging, 2018 aber extrem niedrig war (**Abb. 1a**). Bei Zunahme von Hitzewellen steigt die Gefahr von Dürre in einem an sich schon niederschlagsarmen Gebiet [8]. Der Klimawandel spiegelt sich für Linz in der Zunahme der Tage > 20 °C (R² = 0,26; p = 0,009) und > 25 °C (R² = 0,18; p = 0,035) im Zeitraum 1993 bis 2017 wider. Parallel

Abkürzungen

Frühblüher	Bäume und Sträucher – bei allergenen Pflanzen: Hasel, Erle, Birke
MTF	mittlerer Tagesfrost = $\int_{24}^1$ Stundentemperaturen < 0 °C / 24 Stunden; Frost definiert als Temperatur < 0 °C mit Gefrierpunkt des Wassers als pflanzenphysiologischer Grenztemperatur
MTF _{kumul}	mittlerer Tagesfrost kumuliert ab 1. Januar jeden Jahres
MTW	mittlere Tageswärme = $\int_{24}^1$ Stundentemperaturen > 0 °C / 24 Stunden
MTW _{kumul}	mittlere Tageswärme kumuliert ab 1. Januar jeden Jahres
NS	Tagesniederschlag in mm = L/m ²
NS _{kumul}	Tagesniederschlag kumuliert ab 1. Januar
PF	Pollenflug = Zeit der Pollination = männliche Blüte windblütiger Pflanzen
PF-Beginn	Pollenflugbeginn (PFB): phänologisch definiert als Tag des erstmaligen Erreichens der PK 10 Pollen/m ³ (PK10) bei Hasel, Erle und Birke und PK 5 Pollen/m ³ (PK5) bei Gräsern
PF-Ende	Pollenflugende analog zu PF-Beginn definiert als letztmaliges Erreichen von PK10 bzw. PK5
PK	mittlere Pollenkonzentration eines Tages als Pollen/m ³ Luft
Pollensaison	PF-Dauer: definiert als Datum des PF-Endes minus PF-Beginns + 1 Tag
RF	relative Feuchte in % = effektive Feuchte/Sättigungsfeuchte × 100 = effektiver Dampfdruck/Sättigungsdampfdruck der Luft × 100
RF _{kumul}	RF kumuliert ab 1. Januar: wenn hoch, Ausdruck von längeren feuchten; wenn niedrig, von trockenen Phasen (Dürre)
Sommerblüher	Kräuter + Stauden – Vertreter bei Allergophyten: Gräser
SPIn	saisonales Pollenintegral = Summe der saisonalen mittleren Pollenkonzentrationen
THT	Tageshöchsttemperatur
TMT	Tagesmitteltemperatur = $\int_{24}^1$ Stundentemperaturen / 24 Stunden
TTT	Tagestiefsttemperatur
Wärme	definiert als Temperatur > 0 °C mit Gefrierpunkt als vegetativer Grenze

Abb. 1a: Jahresmittelwerte von Tageshöchst-, Tagesmittel- und Tagesniedertemperaturen sowie Niederschlags-Tagesmittel in Linz – 2018 vs. 1993 bis 2017

JMT, Jahresmitteltemperatur; MMT, Monatsmitteltemperatur; 2018 wurden über 10 Monate hinweg überdurchschnittliche Monatswerte gemessen („Wärmejahr“). Februar und März fallen wegen unterdurchschnittlicher Temperaturen durch Frost auf. Entsprechend liegt 2018 ein Frost-Hitze-, das heißt ein Hybridjahr vor, mit unterschiedlichen Einflüssen auf die Frühblüher (Hasel, Erle, Birke) und Sommerblüher (Gräser).

Abb. 1b: Jahresmittel- und Monatsmitteltemperaturen in Linz – 2018 vs. 1993 bis 2017

nahm der Frost bis 2018 signifikant ab ($R^2 = 0,16$, $p = 0,027$). Der Januar 2018 war überdurchschnittlich warm (Monatsmittel: 4,5 °C) und gleichzeitig der feuchteste der letzten 26 Jahre (Monatsmittel: 97 mm). Nach Kälteeinbrüchen im Februar und März setzte eine Erwärmung ein, die im April zu den höchsten Monatsmitteltemperaturen des letzten Vierteljahrhunderts führten. Dies war gepaart mit einer anhaltenden Trockenheit (relative Feuchte [RF] April: 51,8 % – siehe auch **Abb. 8a** und **8b**). 2018 lag die Temperatur in zehn Monaten über dem Durchschnitt von 1993 bis 2017. Zwei Monate waren unterdurchschnittlich kalt (**Abb. 1b**).

Die sichtbarste Langzeitfolge der Klimaerwärmung ist ein „früher Frühling“ [9, 10]. Nach Keenan

et al. [11] zieht dieser ein frühes Vegetationsende nach sich. Es steigt zwar durch den verstärkten CO_2 -Ausstoß die pflanzliche Biomasse in der Nördlichen Biosphäre [12], der Effekt wird aber durch die Häufung saisonaler Wasserdefizite im Sommer und Herbst wettgemacht [13]. Klinisch-palynologisch definieren Blühbeginn, -dauer und -intensität die Pollensaison [14]. Für Blühprognosen des Österreichischen Pollenwarndienstes wurden die Tageshöchsttemperaturen (THT) [15, 16, 17] und aufsummierten Tagesmitteltemperaturen (TMT_{cumul}) [18] und als Stichtage der 1. Dezember des Vorjahres oder der 1. Januar desselben Jahres verwendet. Begründet wird dies damit, dass (a) mitteleuropäische Bäume und Sträucher einen Kältereiz als Freigabe-

signal für die temperaturabhängige Entwicklung der Blüte benötigen [19, 20] und (b) Temperatursummen aus phänologischer Sicht bei Hasel, Erle und Birke die primäre Einflussgröße ist [21]. Bei der Hasel erfolgen Blattschub und Wachstum nach, bei der Birke parallel zur Blüte. Bei den allergenen Sommerblüher (Gräsern und Kräutern) gehen Pflanzenwachstum und Differenzierung der Blühperiode voraus. Für letztere spielen optimale Start-up-Bedingungen in Form von Temperatur, Niederschlag und RF eine wichtige Rolle [22].

Untersuchungsgebiet

Linz, die Hauptstadt von Oberösterreich, liegt 260 m über Adria und ist eine Industriestadt mit 200.000 Einwohnern und weiteren 300.000 in den umliegenden Gemeinden. Die Stadt erstreckt sich über 96 km² und liegt an der Donau in einem Becken, das von West-Nordwest-Südost (W-NW-SO) vom Kristallin des Böhmisches Massivs mit Höhen bis 930 m begrenzt wird und nach S-SW gegen das Alpenvorland hin offen ist. Seine Flächen verteilen sich laut Magistrat Linz auf:

- 34,8 % Bauland inklusive Industrie
- 11,6 % Verkehrsflächen
- 6,4 % Gewässer sowie
- 47,3 % Wald und Grünland

Hauptpollenquellen sind einerseits die Auwälder der Donau und ihrer Zuflüsse (mit Erlen: *Alnus glutinosa* und *A. incana*) und der pollenemittierende Grüngürtel um die Stadt (mit Birke = *Betula pendula*, Hasel = *Corylus avellana*, Gräsern = *Poaceae*).

Methoden

Für die Pollenmonitoring-Station Linz (ATLINZ, N48,303179/O14,305636°, Beginn 1985) des Oberösterreichischen Pollenwarndienstes [23] wird eine Burkard-Pollenfalle verwendet, die 20 m über Grund auf einem Dach des Kepler Universitätsklinikums, Med-Campus III (früher AKh Linz) montiert ist. Die Pollenzählung erfolgt standardisiert [24] mittels Lichtmikroskop seit 1987 durch den gleichen Analytiker. Die mittlere Pollenkonzentration eines Tages pro m³ Luft (PK) wird in die EAN(European Aeroallergen Network)-Datenbank, in Kooperation mit dem Österreichischen Pollenwarndienst in Wien, eingespeist. Von dort wurde sie für die vorliegende Arbeit abgerufen. Saisonal aufsummierte PK werden als saisonales Pollenintegral [25], kurz SPIn, bezeichnet. Durchgehende Messreihen von Erle, Hasel, Birke und Gräser liegen seit 1993 vor. Jahre mit saisonalen Datenlücken > 6 Tage wurden nicht berücksichtigt.

Beginn und Ende des Pollenflugs (PF) werden phänologisch als erst- und letztmaliges Erreichen von 10 PK für Erle, Hasel und Birke sowie 5 PK für Gräser definiert. Die Zeit dazwischen gilt als PF-

Dauer. Wegen der im Studienzeitraum enthaltenen sechs Schaltjahre wurde Jahrestagen gegenüber dem Kalenderdatum der Vorzug gegeben.

Für den meteorologischen Datensatz von 1993 bis 2018 wurden Stunden- und Tageswerte für Temperatur (°C), Niederschlag (mm = L/m²) und relative Feuchte (in %) der Station Linz-Stadt (M1) der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG Wien-Salzburg), ein Kilometer von der Pollenfalle entfernt, herangezogen. Aus den Stunden- und Tageswerten leiten sich die Tageshöchsttemperaturen (THT), Tagesmitteltemperaturen (TMT) und Tagestiefsttemperaturen (TTT) ab. Davon unterschieden wurde die mittlere Tageswärme (MTW = $\frac{1}{24}$ Stundentemperaturen > 0 °C/24 Stunden; Wärme definiert als Temperatur > 0 °C als pflanzenphysiologische Grenztemperatur).

Für den meteorologisch getriebenen PF-Beginn wurden die kumulative mittlere Tageswärme (MTW_{kumul} ab 1. Januar = Summe der mittleren Tageswärme) sowie eine distinkte THT-Schwelle benutzt. Davon abgegrenzt wurde analog der Einfluss von Frost (MTF_{kumul} = Summe des mittleren Tagesfrosts < 0 °C). Für MTW_{kumul} und MTF_{kumul} wurden von 1993 bis 1999 Halbstundentemperaturen der Messstation M2 am 24er-Turm der Stadt Linz (Oberösterreichisches Luftmessnetz, OÖ Luftmessnetz), circa 2,2 Kilometer von der Pollenfalle entfernt, verwendet; ab dem Jahr 2000 Stundentemperaturen der ZAMG (M1).

Für die Abbildungen, Tabellenkalkulationen und Regressionen wurden die Programme Microsoft Excel 2003 und 2010 sowie SigmaPlot von Systat Software Inc. (zusammen mit den in den Programmen implementierten Analysefunktionen) verwendet.

Ergebnisse

Erle (*Alnus*) und Hasel (*Corylus*)

Pollenflug (PF)-Beginn-, -Verlauf und -Dauer

Frost verzögert den Blühbeginn der Erle signifikant. Die größten Verzögerungen traten 2006 (Frostmaximum, Tag 86), 2005 und 2003 auf (**Abb. 2**). Die hohe Varianz des PF-Beginns (**Tab. 1**) erklärt sich aus unterschiedlich intensiven Frostphasen.

Abb. 3 zeigt die hoch signifikante Verzögerung des Erreichens des erforderlichen MTW_{kumul}- und THT_{kumul}-Niveaus durch Frost bei der Blüte beziehungsweise dem PF-Beginn der Hasel. Bedingt durch den warmen, beinahe frostfreien Januar 2018, erfolgte der PF von Erle und Hasel zum frühesten Zeitpunkt am 31. Januar. Diesem Tag entsprechen eine MTW_{kumul} von 126,4 °C und eine maximale THT ein bis fünf Tage vor PF-Beginn von 11,2 °C (**Tab. 2**). MTW_{kumul} als prä Saisonale Entwicklungstemperatur muss bis zum PF-Beginn relativ konstant im Mittel 103,8 °C (Median 99,9 °C) erreicht haben, ähnlich THT_{kumul} als Blüherfordernis mittlere 175,1 °C.

MTF_{kumul}, mittlerer Tagesfrost kumuliert ab 1. Januar jeden Jahres; PF-Beginn, Pollenflugbeginn; Die lineare Korrelation ($R^2 = 0,528$; $p = 0,002$) zeigt den Einfluss von Frost (MTF_{kumul}) auf die Verzögerung des Blühbeginns 1993 bis 2018 (19 Saisons). Die Jahre 2006 und 2005 zeigen die größten Verzögerungen gegenüber 2018; 2006 liegt ein Frostmaximum vor. Die 95 %-Vertrauensgrenzen sind eingetragen.

Abb. 2: Blühbeginn von Erle (*Alnus*) vs. Frost [MTF_{kumul}]

Jahre mit frühem Blühbeginn tendieren zu einer längeren Pollensaison. Da die PF-Dauer der Hasel signifikant ($R^2 = 0,72$; $p < 0,001$) mit der Zunahme der Tageswärme korreliert, ist der PF in warmen Jahren verlängert, ohne mit einem erhöhten SPIn einherzugehen.

Einflüsse durch Frost auf Blüte und Pollenproduktion von Erle und Hasel

Minimale Frostepisoden mit MTF_{kumul} knapp unter 0 °C gingen dem Blühbeginn der Hasel und Erle 2018 voraus (Abb. 4). Vom 24.2. bis 4.3.2018 kam es zu einem nachhaltigen Kälteeinbruch, der zu einer Unterbrechung der Haselblüte führte. Die Erlenblüte zeigte einen mit der Hasel korrespondierenden frühen Blühbeginn mit niedrigen PK, dafür eine verspätete Hauptphase. Diese bestand aus zwei mar-

kanten Pollengipfeln, die ein neuerlicher Kälteeinbruch zwischen 18.3. und 22.3. beendete. Die Erle scheint durch Frost vor und nach Blühbeginn nicht unter Frostschäden zu leiden. Die tiefsten MTF 2018 von -4,6 bis -9,1 °C lagen zwischen Tag 56 bis 61, das heißt fünf bis acht Tage vor dem ersten großen Pollengipfel. Betrachtet man das Jahr 2018 isoliert, könnte man auf einen gepulsten, zeit- und möglicherweise dosisabhängigen Kälteeinfluss schließen. Betrachtet man aber das Jahr im Kontext aller Jahre von 1993 bis 2018, so sind die SPIn linear positiv mit zunehmendem Frost bis Pollenflugende ($R^2 = 0,196$; $p = 0,0575$) sowie negativ mit Wärme (MTW_{kumul} $R^2 = 0,276$, $p = 0,021$) korreliert. Dies weist darauf hin, dass der positive Einfluss von Minus- sowie kühlen Temperaturen auf die Steigerung der SPIn der Erle ein zeitlich nicht genau begrenzter Effekt ist. Im Gegensatz zur Erle spielt präseasonaler Frost bei der Hasel keine Rolle für die SPIn ($R^2 < 0,1$). Wärme treibt die SPIn von Hasel bis zum Erreichen eines Sättigungswertes der MTW_{kumul} von circa 500 °C.

Birke (*Betula*)

Pollenflugbeginn und -dauer

Der PF-Beginn von 1993 bis 2018 schwankte auffällig gering um den Median 91,5 und arithmetischen Mittelwert (Mean) ± 1 Standardabweichung (SD) $93,0 \pm 7,2$ Tagen (Tab. 1). Beim Blühbeginn am 2.4.2018 bestanden eine Entwicklungstemperatur MTW_{kumul} von 314,2 °C und eine Öffnungstemperatur von THT 13,7 bis 14,5 °C. In Abb. 5 ist exemplarisch für die Birke dargestellt, wie der Blühbeginnkorridor durch Interaktion von drei Faktoren bestimmt wird: artspezifischer Blühbeginn, kumulierter MTW und THT-Schwelle. Für alle Saisons verschiebt Frost den Birken-PF nur marginal

Tab. 1: Pollenflugbeginn von Hasel (*Corylus*), Erle (*Alnus*), Birke (*Betula*) und Gräsern (*Poaceae*)

Pollenflugbeginn (PFB) Hasel PK10 Tag		Erle PK10 Tag	Birke PK10 Tag	Gräser PK5 Tag
Vorverlagerung – Trend	keiner p = 0,34	keiner p = 0,88	keiner p = 0,59	Tendenz p = 0,062
Mittelwert	55,4	51,7	93,0	118,6
Standardfehler	3,43	2,90	1,79	2,40
Median	58,5	50,0	91,5	117,0
Standardabweichung	15,35	12,64	7,16	8,98
Minimum	31	31	81	107
Maximum	86	74	109	136
Saisonen	20	19	16	14
SD% Mean	27,7	24,4	7,7	7,6
Pollenflugbeginn-Korridor = Streuung des Pollenflugbeginns				
PK5, Pollenkonzentration 5 Pollen/m³; PK10, Pollenkonzentration 10 Pollen/m³; SD, „standard deviation“

Die kumulierte mittlere Tageswärme (MTW_{kumul}) muss als präseasonale Entwicklungstemperatur bei Blühbeginn im Mittel 104,6°C erreicht haben. Ähnlich konstant verhält sich als Blüherfordernis die kumulierte Tageshöchsttemperatur (THT_{kumul}) von 194,9°C. Frost (MTF_{kumul} mittlerer Tagesfrost) schiebt den Pollenflug hinaus, bis die für die Blüte erforderliche MTW_{kumul} bzw. THT_{kumul} erreicht sind. Die Tagesmitteltemperatur (TMT_{kumul}) birgt frostbeeinflusst eine ähnliche Information wie MTF_{kumul}, ist mit $R^2 = 0,35$ aber geringer korreliert. Der PF-Beginn der Hasel 2018 am Tag 31 war der früheste in 26 Jahren, bedingt durch minimalen präseasonalen Januarfrost von nur MTF_{kumul}-0,9°C.

Abb. 3: Hasel (*Corylus*) PK 10– kumulierte Temperaturen am Pollenflugbeginn von 1993 bis 2018 (20 Saisons)
[MTW_{kumul}, TMT_{kumul}, THT_{kumul}, MTF_{kumul}]

($R^2 = 0,22$; $p = 0,066$). Die Blüherfordernis bleibt relativ konstant bei MTW_{kumul} von $336,1 \pm 55,8$ (Mean ± 1 SD, Median 335,4 °C). Die THT bei PF-Beginn betrug bei 16 Saisons ein bis fünf Tage vor PF-Beginn $17,5 \pm 3,7$ °C (Tab. 2). Analoge PF-Beginnkorridore sind für Hasel und Erle konstruierbar.

Die Dauer der Birkenpollensaisons steigt signifikant mit dem intrasaisonalen Wärmeangebot ($R^2 = 0,7953$; $p < 0,001$ für MTW_{kumul}). Der Einfluss von Niederschlag im Sinne eines humiden Anspruchs der Birke ist vernachlässigbar (NS_{kumul} $R^2 = 0,14$; $p = 0,15$). Eine Sonderstellung nimmt das Jahr 2018 ein,

Tab. 2: Zusammenhang von Tageshöchsttemperatur und Pollenflugbeginn von Hasel (*Corylus*), Erle (*Alnus*), Birke (*Betula*) und Gräsern (*Poaceae*)

Tageshöchsttemperatur			THT °C bei Pollenflugbeginn		
1993–2018	Saisons	THT-Bereich	Median	Mean ± 1 SD	Bereich
Hasel (<i>Corylus</i>) PK5	20	Tag Ø	11,10	9,95 $\pm$ 5,02	1,5–18,1
		Tag –1 bis –5	11,05	10,79 $\pm$ 3,22	4,4–16,9
Hasel (<i>Corylus</i>) PK10	20	Tag Ø	11,65	11,30 $\pm$ 4,16	2,7–18,1
		Tag –1 bis –5	11,70	11,55 $\pm$ 2,88	5,1–16,9
Erle (<i>Alnus</i>) PK5	19	Tag Ø	9,50	9,64 $\pm$ 4,44	1,5–16,2
		Tag –1 bis –5	10,90	10,57 $\pm$ 3,47	4,1–16,9
Erle (<i>Alnus</i>) PK10	19	Tag Ø	10,30	10,17 $\pm$ 4,15	1,5–16,6
		Tag –1 bis –5	10,30	10,63 $\pm$ 3,51	4,5–16,9
Birke (<i>Betula</i>) PK10	16	Tag Ø	16,65	16,91 $\pm$ 3,87	10,5–23,9
		Tag –1 bis –5	16,45	17,51 $\pm$ 3,72	9,7–23,1
Birke (<i>Betula</i>) PK100	16	Tag Ø	16,65	15,51 $\pm$ 5,64	4,6–23,9
		Tag –1 bis –5	16,65	17,54 $\pm$ 3,89	10,6–23,1
Gräser (<i>Poaceae</i>) PK5	14	Tag Ø	20,05	20,00 $\pm$ 4,06	13,2–29,7
		Tag –1 bis –5	21,35	21,10 $\pm$ 3,16	15,2–26,0
Gräser (<i>Poaceae</i>) PK10	14	Tag Ø	19,95	19,76 $\pm$ 6,66	8,7–30,2
		Tag –1 bis –5	22,95	23,14 $\pm$ 3,50	14,9–29,4

Pollenflugschwelle: PK5, Pollenkonzentration 5 Pollen/m³; PK10, Pollenkonzentration 10 Pollen/m³; PK100, Pollenkonzentration 100 Pollen/m³; Tageshöchsttemperatur: THT Ø, Tageshöchsttemperatur am Tag des Pollenflugbeginns; THT Tag –1 bis –5; Tageshöchsttemperatur ein bis fünf Tage vor Pollenflugbeginn; SD, „standard deviation“

PK, Pollenkonzentration (je m^3); MTW_{kumul} mittlerer Tagesfrost; MTW_{kumul} kumulierte mittlere Tageswärme; THT, Tageshöchsttemperatur; *Pollenkonzentrationen der Erle vom 31.1. bis 30.4. Schwache Frosteinflüsse ($MTF_{kumul} - 0,9^\circ C$) im Januar vor Blühbeginn bei Koinzidenz von MTW_{kumul} ($126,4^\circ C$ – unterbrochene Linie) und der THT-Schwelle ($11,2^\circ C$) als Blüherfordernis – analog früher Pollenflugbeginn der Hasel. Frost im Februar und März führte zu einer Blühunterbrechung der Hasel und Verzögerung der Hauptblüte der Erle. Auch die tiefsten Temperaturen zeigten keine Frostschädigung der Erlenblüte, im Gegenteil deuten sie sogar auf eine frostinduzierte Stimulierung der Pollenproduktion hin.

Abb. 4: Einfluss von Wärme und Frost auf die Konzentration von Erlenpollen (*Alnus*) und Haselpollen (*Corylus*) 2018

in dem vor allem im April die ausgeprägte Niederschlagsarmut (Dürre) in Kombination mit Hitze die PF-Dauer verkürzte (Abb. 6a).

Der Einfluss niedriger präseasonaler Temperaturen auf die Pollenproduktion

Die Birke wies 2003 das höchste SPIn auf. Auch die Jahre 2004, 2005 und 2006 liegen über dem 26-Jahre-Trend [18] ähnlich wie 2018. Die tiefsten MTF von $-4,1$ bis $-5,2^\circ C$ traten 2003 zwischen Tag 45 bis 49 auf, das heißt 57 bis 65 Tage vor dem ersten großen Pollengipfel der Birke. Es liegt kein direkter zeitlicher Bezug von SPIn zu Frost vor. Wie bei der Erle sind aber die SPIn der Birke linear negativ ($R^2 = 0,3259$; $p = 0,0209$) mit präseasonaler MTW_{kumul} korreliert, das heißt, kühleren Temperaturen stimulieren die Pollenproduktion (SPIn) (Abb. 6b).

Gräser (*Poaceae*)

Pollenflug (PF)-Beginn und -Dauer

Es zeichnet sich eine Tendenz ($R^2 = 0,2614$; $p = 0,062$) zu einem früheren PF-Beginn ab. Der früheste erfolgte 2018 am 107. Jahrestag. Die PF-Dauer bleibt über die Jahre annähernd konstant ($R^2 < 0,1$). Sie lag 2018 bei 108 Tagen. Die PF-Saisons dauern bei PK5 $106,1 \pm 17,2$ Tage (Mean ± 1 SD).

Die Gräserpollensaison 2018 war zeitlich gegenüber 1994 bis 2017 vorverlagert, parallel dazu der Haupt-Peak (Abb. 7a). Da die Zahl der Gräserpollen-Peaks zwischen 1994 bis 2017 (30) und 2018 (26) ähnlich ist, dürfte sie primär auf eine gestaf-

MTW_{kumul} kumulierte mittlere Tageswärme; THT, Tageshöchsttemperatur; PF, Pollenflug; PF-Beginn, Pollenflugbeginn; Der Bereich des Pollenflugbeginns zwischen 1993 bis 2017 (15 Saisons) lag bei Tag $93,0 \pm 14,2$ (Mean ± 2 SD; Median 91,5; Bereich 81–109; auf x-Achse). Der Pollenflug beginnt beim Zusammentreffen von kumulierter mittlerer Tageswärme (MTW_{kumul} $M \pm 1SD$ $336,1 \pm 55,8^\circ C$; auf y-Achse) und Überschreiten einer minimalen Tageshöchsttemperatur ($THT_{minim} > 13,6^\circ C$ während der letzten 5 Tage vor PF bzw. $> 13,0^\circ C$ am PF-Tag 0; y-Achse) innerhalb des artspezifischen Blühbeginnbereichs. Superponiert für 2018 sind als Konzeptbeweis die MTW_{kumul} und Stundentemperaturen (*10) ab 1.1.2018. Am Tag 92 setzte 2018 der Birkenpollenflug bei MTW_{kumul} $314,2^\circ C$ (als Entwicklungstemperatur) und koinzidenter THT_{minim} (Öffnungstemperatur) von $13,7$ bis $14,5^\circ C$ ein. MTW_{kumul} und THT-Schwelle bieten sich für die meteorologische Vorhersage des PF-Beginns an.

Abb. 5: Blühbeginnkorridor für die Birke (*Betula*): PF-Beginn 2018 am Tag 92 im Korridor der Birkenblüte bei Koinzidenz von THT- und MTW_{kumul} der Saisons 1993–2017

felte beziehungsweise gepulste Blühfolge diverser Gräserarten zurückgehen. Die höheren Pollengipfel in der ersten Hälfte der Saison deuten auf pollenproduktivere Arten hin [26]. Die niedrigeren PK der zweiten Saisonhälfte sind wahrscheinlich auch vom landwirtschaftlichen Grasschnitt beeinflusst.

Einflüsse von Feuchte und Trockenheit auf die Pollenproduktion

Die präseasonale kumulierte relative Feuchte (RF_{kumul}) weist eine hoch signifikante Korrelation mit dem PF-Beginn auf ($R^2 = 0,8826$; $p < 0,001$) (Abb. 8a), die deutlich die Einzelgrößen Wärme ($R^2 = 0,3173$; $p = 0,005$) und Niederschlag ($R^2 = 0,3377$; $p = 0,004$) für Gräserwachstum und Blütenanlage [27] übertrifft. RF repräsentiert dabei das Verhältnis von Niederschlag, Bodenfeuchte und Evaporation zur Temperatur (Wärme). Eine niedrige RF steht für Trockenheit beziehungsweise ein Feuchtedefizit. Trockenheit beziehungsweise Dürre führen zu einem frühen PF-Beginn, während Nässe den Blühbeginn verzögert. Wegen der hoch signifikanten Beziehung zwischen RF_{kumul} und PF-Beginn bietet sich die relative Feuchte für die Pollenflugvorhersage der Gräser an.

Die höchsten Gräser-SPI_n traten in den Jahren 1994, 2001, 2002 und 2004 auf. Über die 26 Jahre nahm die kumulierte RF kontinuierlich ab (Abb. 8b), was auf eine zunehmende Trockenheit hinweist. Bei linearer Regression nahm die Pollenproduktion von 1994 bis 2018 ab sowohl was die Gesamtzahl (SPI_n $R^2 = 0,36$; $p = 0,024$) als auch die PK der Haupt-Pollen-Peaks ($R^2 = 0,32$; $p = 0,035$) betrifft. Durch die größeren Datenlücken ergibt sich jedoch eine Unsicherheit trotz Ausdehnung von 14 PF-Saisons über 25 Jahre. Die polynome Regression zeigt bei einem $R^2 = 0,39$ einen biphasischen Verlauf, mit einer Stabilisierung auf niedrigerem Niveau in den Jahren 2005 bis 2018 (Abb. 7b).

Diskussion

In Linz nahm über 26 Jahre die Temperatur zu und zwar im Sommer- mehr als im Winterhalbjahr. Während die Minustemperaturen pro Jahr kaum abnahmen, nahm die MTW pro Jahr um $0,056^\circ\text{C}$ zu ($R^2 = 0,4151$; $p < 0,001$). Die Korrelation zwischen Wärmezu- und Frostabnahme ist hoch signifikant ($R^2 = 0,519$; $p = 0,00002$), was für eine parallele Verringerung/Verkürzung der winterlichen Frostzeiten spricht [28]. Dagegen fiel im Beobachtungszeitraum der Niederschlag tendenziell, sodass sich das Klima regional in Richtung warm-trocken entwickelte; ablesbar an der kontinuierlich fallenden mittleren RF. Linz als „urbanes Pflaster“ liegt in einer niederschlagsarmen Region, in der sich meteorologische Grenzsituationen wie Niederschlagsdefizite und urbane Überwärmung früh auswirken. Bei Fortset-

Im Zeitraum von 1993 bis 2018 (16 Saisons) ist ein signifikanter Anstieg der Dauer des Pollenflugs bei steigenden intrasaisonalen Temperaturen (MTW_{kumul} mit $R^2 = 0,7953$; $p = 0,00018$) zu verzeichnen. Dagegen zeigt der Niederschlag (NS_{kumul}) nur einen geringfügigen Einfluss ($R^2 = 0,14$; $p = 0,15$). Ersichtlich ist die Sonderstellung des Trockenjahres 2018: Aus der Kombination von großer Wärme, aber kaum Niederschlag, ergibt sich eine mittlere PF-Dauer.

Abb. 6a: Dauer der Pollensaison von Birke (*Betula*) 1993 bis 2018 vs. MTW und NS kumuliert

Die saisonalen Pollenintegrale (SPI_n) sind linear negativ mit präseasonaler mittlerer Tageswärme (MTW_{kumul} $R^2 = 0,326$; $p = 0,0209$) korreliert. Wärme führt zu niedrigen Pollenkonzentrationen, kühle Temperaturen führen zu einer Erhöhung.

Abb. 6b: Pollenkonzentration von Birke (*Betula*) 1993 bis 2018 (16 Saisons) vs. präseasonalen MTW_{kumul}

zung des langjährigen meteorologischen Trends lässt das außergewöhnliche Jahr 2018 ähnliche Situationen in circa 20 Jahren als „gängig“ antizipieren.

Die Erklärung dafür, dass die regionale Klimaerwärmung und zunehmende Trockenheit über 26 Jahre statistisch keine signifikante (fassbare) Änderung des Pollenflugs von Hasel, Erle, Birke und Gräsern nach sich zog, ist in der variablen Saisonalität zu suchen. Der Grund für diese dürfte in der hohen Varianz der den PF bestimmenden präseasonalen Wettersituationen liegen. Daraus resultiert, dass über 26 Jahre die kumulierte MTW bis Tag 90 keine signifikante Änderung zeigt ($R^2 = 0,023$; n.s.) im Gegensatz zur Jahreserwärmung ($R^2 = 0,339$; $p =$

PF, Pollenflug; PK, mittlere Pollenkonzentration eines Tages als Pollen/m³ Luft; Die PK sind besonders 2018 in der ersten Hälfte höher als in der zweiten Hälfte. Das Multi-Peak-Profil ist sowohl 2018 als auch in früheren Saisons nachweisbar, ähnlich die Zahl der Pollen-Peaks, wahrscheinlich primär bedingt durch eine gestaffelte Abfolge der Blüte einer Vielzahl von Gräsern. 2018 dauert der PF gleich lang wie früher, ist aber vorverlagert, ebenso der Haupt-Peak.

Abb. 7a: Gräser (*Poaceae*) – Pollenflugsaison 2018 vs. Mittel von 13 kongregierten Saisons zwischen 1994 und 2017

SPIn, saisonales Pollenintegral; PK, mittlere Pollenkonzentration eines Tages als Pollen/m³ Luft; Bei linearer Regression nehmen beide ab, SPIn mit $R^2 = 0,3619$ und $p = 0,0228$, die Haupt-Peaks mit $R^2 = 0,3208$ und $p = 0,0347$. Bei polynomer Regression ($R^2 = 0,398$) zeichnet sich eine Stabilisierung auf niedrigerem Niveau zwischen 2005 und 2018 ab.

Abb. 7b: Gräser (*Poaceae*) – Saisonale Pollenintegrale und Haupt-Peaks 1994 bis 2018 (14 Saisons)

März mit Eigengesetzlichkeiten wie höherer Pollenproduktion bei Erle und Birke durch stimulierende Kältereize machen 2018 zu einem ausgesprochenen Hybridjahr.

Bei den frühblühenden Bäumen und Sträuchern Erle, Birke und Hasel beginnt die Anlage und Entwicklung der männlichen Kätzchen schon im Sommer des Vorjahres. Für sie sind im PF-Jahr die Koinzidenz einer distinkten MTW_{kumul} als Entwicklungstemperatur zum Erreichen der Blühbereitschaft und die THT als Impuls- beziehungsweise Öffnungstemperatur für den Start der Pollination erforderlich. Das für die Frühblüher exemplarische Modell des Pollenflugbeginnskorridors der Birke illustriert, wie der artspezifische Blühbeginn durch MTW_{kumul} und eine THT-Schwelle zeitlich eingengt werden. Es umreißt die Kriterien für eine meteorologische PF-Beginnsvorhersage. Analoge PF-Beginnskorridore sind für Hasel und Erle konstruierbar, da die Blühbedingungen gleichen Prinzipien folgen. Als dritte meteorologische Determinante des PF-Beginns tritt Frost hinzu. Frost verzögert den Blühbeginn von Hasel und Erle und erklärt dessen hohe Varianz. 2006 erfolgte der PF-Beginn wegen des beobachteten Frostmaximums 55 Tage später als der früheste 2018. Warme beziehungsweise frostarme Winter führen zu einer Blühphasenverschiebung bei Erle und Hasel nach vorne. Die präseasonalen MTW_{kumul} und THT-Schwellen blieben bei aller Variabilität in den letzten 26 Jahren auffallend konstant und damit als Haupttreiber des PF-Beginns unverändert.

Die saisonale Pollenproduktion folgt bei Hasel, Erle und Birke anderen Mechanismen als der PF-Beginn. Frost führte 2018 zu einer Blühunterbrechung bei Hasel und Erle. Präseasonaler Frost und kühle Temperaturen stimulierten bei der Erle die Pollenproduktion (SPIn), während die Hasel hierzu der Wärme bedurfte. Die Birke zeigt das Paradoxon, dass sie zwar höhere Temperaturen für die Blühbereitschaft verlangt als Erle und Hasel, aber ebenfalls kühle präseasonale Temperaturen die SPIn steigern [18]. Aufgrund der nordisch/alpinen beziehungsweise montanen Verbreitungsschwerpunkte von Hängebirke (*B. pendula*) und Grauerle (*A. incana*) macht diese Strategie durchaus Sinn, da hauptsächlich Frost im Frühling die Verbreitungsgrenzen bestimmt [29]. Der Mechanismus ist jedoch unbekannt. Die Wärmestimulation der Hasel könnte mit ihrem unterschiedlichen (südosteuropäischen und kleinasiatischen) Herkunfts- und Verbreitungsgebiet zusammenhängen. Die Wärme-Frost-Hypothese erklärt Schwankungen der SPIn bei den Frühblüheren zwischen Jahren mit Kältestimulation und Wärmejahren mit frühem Blühbeginn ohne Kältereize. Das Jahr 2003 weist

0,0018). Die phänologischen Zusammenhänge und Gesetzmäßigkeiten hinter dieser Varianz werden diskutiert. Bei Birke und Gräsern ist in Zukunft eher eine Vorverlagerung der PF-Periode zu erwarten; bei den Gräsern scheint sich diese Tendenz bereits abzuzeichnen.

2018 war in Linz bei einer überdurchschnittlichen Temperaturerhöhung in zehn/zwölf Monaten ein Wärmejahr und aufgrund eines Niederschlagsdefizits ebenfalls in zehn/zwölf Monaten ein Trockenjahr. Zusätzliche Kälteperioden im Februar und

die höchsten SPIn von Erle und Birke auf. Solche pollenreichen Jahre („Mastjahre“) lassen sich durch einen Synergieeffekt aus verstärkter präseasonaler Kältestimulierung der Pollenproduktion und einem stärkeren Knospenansatz im Vorjahr erklären [30]. Steigende Wärme während der Pollensaison verlängert – wie auch bei Hasel und Erle – die PF-Dauer der Birke. Hitze in Kombination mit ausgeprägter Niederschlagsarmut (Dürre) wie 2018 verkürzen diese andererseits. Dies ist für die Intensität der Birkenpollenbelastung in überhitzten urbanen Gebieten von Bedeutung. Im Gegensatz zu den präseasonalen meteorologischen Bedingungen, die primär die Pollenintensität der Frühblüher steuern, spielt zum Beispiel Wärme während des Pollenflugs statistisch für die SPIn nur eine untergeordnete, modifizierende Rolle.

Die Gräser zeigten 2018 den frühesten PF-Beginn. Der Grund wird in der Trockenheit und auffällig warmen Temperaturen im April gesehen. Die niedrigste RF 2018 reflektiert das Verhältnis beider. Nicht nur, dass über 26 Jahre die kumulierte RF kontinuierlich gefallen ist, erweist sich RF_{kumul} auch als bester Prädiktor für den PF-Beginn der Gräser. Bei multivariater Analyse dominiert RF_{kumul} den PF-Beginn so sehr, dass die beiden anderen Einflussfaktoren, MTW_{kumul} und NS_{kumul} unbedeutend werden. Nässe, kombiniert mit Wärme, schiebt dagegen den Blühbeginn nach hinten. Von 1994 bis 2018 nahmen sowohl die Gesamtzahl (SPIn) als auch die Konzentrationen der Haupt-Pollen-Peaks der Gräser linear ab. Bei polynomer Regression zeigt sich ein biphasischer Verlauf mit einer Stabilisierung beider Parameter auf niedrigerem Niveau zwischen 2006 bis 2018. Anstelle längerer Regenperioden, welche die Pollenkonzentrationen allgemein senken, traten 2018 episodische Niederschläge, wie sie für die Klimaerwärmung prognostiziert werden [31]. Diese können das Graswachstum und die Pollenproduktion in den Folgetagen stimulieren [32, 33] und Produktionsverluste infolge Trockenheit beziehungsweise Dürre, zumindest teilweise, kompensieren. Kompensation könnte die Stabilisierung der Gräser-SPIn während der jüngeren Klimaerwärmung erklären. Die Blühdauer der Gräser blieb über die Jahre relativ konstant. Dementsprechend hatte der frühe Blühbeginn der Gräser 2018 auch ein früheres Blühende zur Folge. Dies entspricht der Blühphasen-Hypothese (siehe oben), dass ein früher Frühling ein frühes Vegetationsende im Herbst nach sich zieht [11].

Trotz Jahreserwärmung im letzten Vierteljahrhundert und gestiegener CO_2 -Luftkonzentrationen haben die Pollenkonzentrationen von Hasel, Erle, Birke und Gräsern bei Trendanalyse mehrheitlich nicht zu-, sondern abgenommen. Die Zunahme der

RF, relative Feuchte; PFB/PF-Beginn, Pollenflugbeginn; MTW_{kumul} kumulierte mittlere Tageswärme; NS_{kumul} Tages-NS kumuliert ab 1.1.; RF_{kumul} relative Feuchte kumuliert ab 1.1.; Trockenheit (RF-Defizit) verlagert den PFB der Gräser deutlich nach vorne. Bei multivariater Analyse dominiert RF_{kumul} den PFB ($R^2 = 0,8787$; $p = 4,37 \cdot 10^{-11}$) so sehr, dass die beiden anderen Einflussfaktoren, MTW_{kumul} ($R^2 = 0,317$; $p = 0,0051$) und NS_{kumul} ($R^2 = 0,338$; $p = 0,0036$), unbedeutend werden. Wegen der signifikanten Beziehung zwischen RF und PFB bietet sich RF_{kumul} als Prädiktor für den PF-Beginn an.

Abb. 8a: Gräser (*Poaceae*) – relative Feuchte und Pollenflugbeginn 1993 bis 2018 (PF-Beginn-Tag vs. $RF\%_{\text{kumul}}$ bis PF-Beginn)

RF, relative Feuchte;
Auffällig ist die kontinuierliche Abnahme der relativen Feuchte. Diese Entwicklung geht in Richtung semi-arides Klima.

Abb. 8b: Relative Feuchte im Jahresmittel von 1993 bis 2018 (RF-Abnahme entspricht Feuchtedefizit bzw. Lufttrockenheit.)

Pollenallergie sowie der Prävalenz der Sensibilisierung vor allem bei jungen Menschen [34] können damit nicht unmittelbar auf die Klimaerwärmung zurückgeführt werden, sondern müssen in anderen Ursachen gesucht werden. Dafür kommen mehrere Faktoren beziehungsweise Faktorenkomplexe infrage: aerogene, zum Beispiel Luftverunreinigung, Allergenalteration sowie toxische oder kombiniert toxisch-allergische Effekte auf Menschen und Pflanzen, die wiederum selbst in Zusammenhang mit der Klimaveränderung stehen können, etwa NO_x , O_3 , VOC (Stickstoffoxide, Ozon, volatile organische

Komponenten) [35, 36, 37], oder ein urbaner Lebensraum. Daneben ist auch eine Reihe anderer non-aerogener Sensibilisierungs- und Reaktionsverstärker wahrscheinlich.

Dr. Herwig AE Schinko

Pneumologie

Allgemeines Krankenhaus der Stadt Linz

Kepler Universitätsklinikum, Med Campus III

Bergweg 16

A-4203 Altenberg/Linz

Österreich

E-Mail: herwig@schinko.co.at

Danksagung

Wir danken der ZAMG Salzburg-Wien (J. Haslhofer) und der Abteilung Umweltschutz des Amtes der OÖ Landesregierung (R. Pürmayr) für die Bereitstellung meteorologischer Daten; dem Umweltmanagement des Magistrats der Landeshauptstadt Linz (W. Hager) ebenfalls für die Bereitstellung meteorologischer Werte; den Betreibern der EAN-Datenbank des Österreichischen Pollenwarndienstes an der HNO-Klinik der Medizinischen Universität Wien (U. Berger, K. Bastl und M. Bastl); dem technischen Team des Pollenwarndienstes am Kepler Universitätsklinikum Linz (J. Brungraber, P. Lichtenberger, A. Maschik); der Pollenanalytik in Mondsee (J. Schmidt); sowie für ihre Anregungen Ch. Körner (Basel), A. Pauling (Zürich), H. Formayer (Wien).

Interessenkonflikt

R. Schmidt ist seit 32 Jahren als Pollenanalytiker für den Österreichischen Pollenwarndienst tätig; dadurch entsteht jedoch kein Interessenkonflikt mit der präsentierten Arbeit.

B. Lamprecht und H. AE Schinko geben an, dass keine Interessenkonflikte vorliegen.

Zitierweise

Schinko HAE, Lamprecht B, Schmidt R. How will climate change alter the dynamics of airborne pollen and pollen load of allergenic plants? The “exceptionally warm year” 2018 in Linz (Upper Austria) – a potential model for the future based on long-term trends. *Allergo J Int* 2021; 30:96–108

<https://doi.org/10.1007/s40629-020-00152-4>

Literatur

- Zwick H, Popp W, Jäger S, Wagner C, Reiser K, Horak F. Pollen sensitization and allergy in children depend on the pollen load. *Allergy* 1991;46:362–6
- Popp W, Zwick H, Steyrer K, Rauscher H, Wanke T. Sensitization to aeroallergens depends on environmental factors. *Allergy* 1989;44:572–5
- Stemeseder T, Klinglmayr E, Moser S, Lüftenegger L, Lang R, Himly M et al. Cross-sectional study on allergic sensitization of Austrian adolescents using molecule-based IgE profiling. *Allergy* 2017;72:754–63
- Austrian Panel on Climate Change (APCC). Austrian Special Report Health, Demography and Climate Change (ASR18). Haas W, Moshhammer H, Muttarak R, Koland O, eds. Wien: Austrian Academy of Sciences Press 2018, p. 331 [URL: https://austriaca.at/APCC_ASR18.pdf]
- Ziello C, Sparks TH, Estrella N, Belmonte J, Bergmann KC, Bucher E et al. Changes to airborne pollen counts across Europe. *PLoS One* 2012;7:e34076
- Bergmann KC. Weather conditions and climate change have an effect on allergies. *Allergo J Int* 2016;25:131–7
- Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG). 2018 mit großer Wahrscheinlichkeit wärmstes Jahr der Messgeschichte. News vom 20.12.2018 (www.zamg.ac.at/cms/de/klima/news/2018-mit-grosser-wahrscheinlichkeit-waermstes-jahr-der-messgeschichte) und [URL: www.zamg.at/histalp]
- Kromp-Kolb H, Formayer H, Haas P, Hofstätter M, Schwarzl I. Beobachtete Veränderung der Hitzeperioden in Oberösterreich und Abschätzung der möglichen zukünftigen Entwicklungen (Endbericht Band 1 der Forschungsreihe „Auswirkungen des Klimawandels auf Oberösterreich“, Februar 2007). BOKU-Met Report 12 2009, pp. 1–31 (https://meteo.boku.ac.at/report/BOKU-Met_Report_12_online.pdf)
- Menzel A, Sparks TH, Estrella N, Koch E, Aasa A, Ahas R et al. European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Glob Change Biol* 2006;12:1969–76
- Peñuelas J, Rutishauser T, Filella I. Ecology. Phenology feedbacks on climate change. *Science* 2009;324:887–9
- Keenan TF, Richardson AD. The timing of autumn senescence is affected by the timing of spring phenology: implications for predictive models. *Glob Change Biol* 2015;21:2634–41
- Forkel M, Carvalhais N, Rödenbeck C, Keeling R, Heimann M, Thonicke K et al. Enhanced seasonal CO₂ exchange caused by amplified plant productivity in northern ecosystems. *Science* 2016;351:696–9
- Buermann W, Forkel M, O’Sullivan M, Sitch S, Friedlingstein P, Haverd V et al. Widespread seasonal compensation effects of spring warming on northern plant productivity. *Nature* 2018;562:110–4
- Bastl K, Kmenta M, Berger UE. Defining pollen seasons: background and recommendations. *Curr Allergy Asthma Rep* 2018;18:73
- Fritz A. Der Pollen- und Sporenflug in Kärnten 1983 und 1984. Carinthia II 1985;175/95:111–24 (www.zobodat.at/pdf/CAR_175_95_0111-0124.pdf)
- Jäger S. Tageszeitliche Verteilung und langjährige Trends bei allergiekompetenten Pollen. *Allergologie* 1990;13:159–82
- Zwander H, Fischer-Wellenborn E, Romauch E. Der Pollenflug in Kärnten im Jahr 2001. Carinthia II 2002;192/112:141–53 (www.zobodat.at/pdf/CAR_192_112_0141-0153.pdf)
- Schmidt R, Schmidt J, Schinko HAE. Aerobiologie – Erfahrungen aus 25 Jahren Pollenflug Linz. In: Schinko HAE, Schmidt R, Lamprecht B, eds. Pollen, der Mensch und die Stadt. Aeroallergie & Aerobiologie, Interdisziplinäres Symposium 2011. Eigenverlag: Linz 2011, pp. 7–28
- Laube J, Sparks TH, Estrella N, Höfler J, Ankerst DP, Menzel A. Chilling outweighs photoperiod in preventing precocious spring development. *Glob Change Biol* 2014;20:170–82
- Pauling A, Gehring R, Clot B. Toward optimized temperature sum parameterizations for forecasting the start of the pollen season. *Aerobiologia* 2014;30:45–57
- Körner C, Basler D. Plant science. Phenology under global warming. *Science* 2010;327:1461–2
- Barnes C, Pacheco F, Landuyt J, Hu F, Portnoy J. The effect of the temperature, relative humidity and rainfall in airborne ragweed pollen concentrations. *Aerobiologia* 2001;17:61–8
- Jäger S, Hirsenschall I, Hürbe E, Schmidt R, Wiesenberger W. Pollenwarndienst des Landes Oberösterreich (LKH Gmundnerberg) und der Stadt Linz (AKH Linz). Mitt Ärztekammer Oberösterreich 1985;81:426–9
- Galán C, Smith M, Thibaudon M, Frenguelli G, Oteros J, Gehrig R et al. EAS QC Working Group. Pollen monitoring:

- minimum requirements and reproducibility of analysis. *Aerobiologia* 2014;30:385–95
25. Galán C, Ariatti A, Bonini M, Clot B, Crouzy B et al. Recommended terminology for aerobiological studies. *Aerobiologia* 2017;33:293–5
 26. Kmenta M, Bastl K, Kramer MF, Hewings SJ, Mwange J, Zetter R et al. The grass pollen season 2014 in Vienna: A pilot study combining phenology, aerobiology and symptom data. *Sci Total Environ* 2016;566–567:1614–20
 27. Schaumberger A. Räumliche Modelle zur Vegetations- und Ertragsdynamik im Wirtschaftsgrünland. Diss. Technische Universität Graz 2011, 264 S.
 28. Medhaug I, Stolpe MB, Fischer EM, Knutti R. Reconciling controversies about the 'global warming hiatus'. *Nature* 2017;545:41–7
 29. Lenz A, Hoch G, Vitasse Y, Körner C. European deciduous trees exhibit similar safety margins against damage by spring freeze events along elevation gradients. *New Phytol* 2013;200:1166–531
 30. Masaka K, Maguchi S. Modelling the masting behaviour of *Betula platyphylla* var. *japonica* using the resource budget model. *Ann Bot* 2001;88:1049–55
 31. Haslinger K, Schöner W, Anders I. Future drought probabilities in the Greater Alpine Region based on COSMO-CLM experiments – spatial patterns and driving forces. *Meteorol Z* 2015;25:137–48
 32. Spijksma FTM, den Tonkelaar, JF. Four-hourly fluctuations in grass-pollen concentrations in relation to wet versus dry weather, and to short versus long over-land advections. *Int J Biometeorol* 1986;30:351–8
 33. Munoz Rodríguez AF, Palacios I, Molina, R. Influence of meteorological parameters in hourly patterns of grass (Poaceae) pollen concentrations. *Ann Agric Environ Med* 2010;17:87–100
 34. Haftenberger M, Laußmann D, Ellert U, Kalcklösch M, Langen U, Schlaud M et al. Prävalenz von Sensibilisierungen gegen Inhalations- und Nahrungsmittelallergene – Ergebnisse der Studie zur Gesundheit Erwachsener in Deutschland (DEGS1). *Bundesgesundheitsbl* 2013;56:687–97
 35. Schinko HAE, Medinger W, Hager W. Pollen, Pollenallergene und partikuläre Luftschadstoffe – Aspektewandel. *Allergologie* 1994;17:514–25
 36. Sénéchal H, Visez N, Charpin D, Shahali Y, Peltre G, Biolley JP et al. A review of the effects of major atmospheric pollutants on pollen grains, pollen content, and allergenicity. *ScientificWorldJournal* 2015;2015:940243
 37. Wooding DJ, Ryu MH, Hüls A, Lee AD, Lin DTS, Rider CF et al. Particle depletion does not remediate acute effects of traffic-related air pollution and allergen. A randomized, double-blind crossover study. *Am J Respir Crit Care Med* 2019;200:565–74