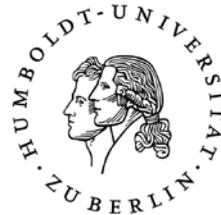


Institution

Humboldt-Universität zu Berlin
Lebenswissenschaftliche Fakultät
Professur Agrarklimatologie

Länderinstitut für Bienenkunde
Hohen Neuendorf e.V.

**Projekttitle**

Honigbiene im Klimawandel
- Abschlussbericht -

Laufzeit

2015-2019

Projektleitung:

Prof. Dr. Frank-M. Chmielewski
Prof. Dr. Kaspar Bienefeld

Projektbearbeitung

Sophie Godow

Auftraggeber

Fachzentrum Klimawandel und Anpassung
im Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie

Projektbetreuung

Fachzentrum Klimawandel und Anpassung

Berlin, Juli 2019



HONIGBIENEN IM KLIMAWANDEL

Projekt „BIENE“

gefördert durch das Fachzentrum Klimawandel
am HLNUG

Endbericht



bearbeitet von der
HUMBOLDT-UNIVERSITÄT ZU BERLIN
Lebenswissenschaftliche Fakultät
Professur Agrarklimatologie

und vom
LÄNDERINSTITUT FÜR BIENENKUNDE
HOHEN NEUENDORF e.V.

Projektbearbeiterin:	Sophie Godow ¹
Projektleiter:	Prof. Dr. Frank-M. Chmielewski ¹ Prof. Dr. Kaspar Bienefeld ²
	¹ Humboldt-Universität zu Berlin Lebenswissenschaftliche Fakultät, Albrecht Daniel Thaer Institut für Agrar- und Gartenbau- wissenschaften Professur Agrarklimatologie Albrecht-Thaer-Weg 5, 14195 Berlin
	² Länderinstitut für Bienenkunde Hohen Neuendorf e.V. Friedrich-Engels-Straße 32, 16540 Hohen Neuendorf

Inhalt

Abbildungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis.....	5
1. Einleitung und Hintergrund.....	6
2. Entwicklung des Bienenflugmodells.....	8
2.1 Modellgrundlage	8
2.2 Kalibrierungs- und Validierungsdaten für das Bienenflugmodell	9
2.3 Kalibrierung des Bienenflugmodells.....	11
2.4 Phänologie relevanter Trachtpflanzen.....	13
2.5 Erweitertes Bienenflugmodell und Validierung.....	15
3. Potentieller Bienenflug in Hessen 1951–2015	18
3.1 Auswahl der Stationen und Datengrundlage	18
3.2 Berechnung des potentiellen Bienenflugs für den Zeitraum 1951–2015	19
4. Mögliche Veränderungen des potentiellen Bienenflugs 2007–2100	20
4.1 Auswahl der Klimamodelle.....	20
4.2 Phänologische Modellierung.....	22
4.3 Phasenbezogene Klimaänderungen in Hessen	25
4.4 Veränderungen in der Phänologie der Trachtpflanzen.....	26
4.5 Mögliche Veränderungen des potentiellen Bienenflugs	27
5. Honigertrag.....	33
6. Zusammenfassung und Ausblick	39
7. Literatur.....	41
Anhang	43
Potentieller Bienenflug (d)	43
Phänologie – Blühbeginn (DOY).....	44
Phänologie – Dauer der Blühphasen (d)	45
Mittlere Lufttemperatur (°C).....	46
Stunden mit einer Niederschlagshöhe > 2.4 mm/h	47
Stunden mit einer Windgeschwindigkeit > 3 m/s	48
Stunden mit einer Globalstrahlung > 200 W/m ²	49

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Potentieller Bienenflug in den Jahren 2013 und 2014	8
Abb. 2	BeeScan an einer Beute in Berlin-Dahlem	9
Abb. 3	Bienenflug an vier Völkern in Mayen 2008 und 2010	11
Abb. 4	Bienenflug von zwei Völkern in Mayen 2013 mit erkennbarer Datenlücke von April bis Mai.	12
Abb. 5	Bienenflug (normiert), Mayen 2010, alle vier Völker (oben), sowie der mittlere Bienenflug im Vergleich mit dem Modellergebnis (unten).	13
Abb. 6	Blühbeginn (Bb) dreier Trachtpflanzen mit unterschiedlicher Blütezeit	14
Abb. 7	Normierter mittlerer Bienenflug aus dem Experiment Mayen 2010 (rot) sowie das Modellergebnis (schwarz) ohne und mit Phänologischem Faktor FakP	15
Abb. 8	Modelldaten und experimentelle Daten des Bienenflugs aus Würzburg, 2013	16
Abb. 9	Modelldaten und experimentelle Daten des Bienenflugs aus Mayen, 2008	17
Abb. 10	Ausgewählte DWD- Wetterstationen	18
Abb. 11	Akkumulierter jährlicher Bienenflug für fünf hessischen Stationen, 1951-2015	18
Abb. 12	Akkumulierter Bienenflug für fünf hessischen Stationen zur Hauptblüte (Hasel bis Winterlinde), 1951–2015	19
Abb. 13	Akkumulierte Bienenflug für fünf hessischen Stationen zur Obstblüte (Süßkirsche bis Apfel), 1951–2015	19
Abb. 14	Validierung des phänologischen Modells für den Blühbeginn von Hasel in DOY an Einzelstationen und im Stationsmittel, 1951–2015	22
Abb. 15	Validierung des phänologischen Modells für den Blühbeginn der Sommerlinde in DOY an Einzelstationen und im Stationsmittel, 1951–2015	23
Abb. 16	Ergebnisse der Modellierung des Blühbeginns für Hasel, Süßkirsche, Birne und Sommerlinde, 1971–2000 und 2011–2100	25
Abb. 17	Ergebnisse der Modellierung der Dauer der Hauptblüte (Blühbeginn Hasel bis Blühende Winterlinde) und der Dauer der Obstblüte (Blühbeginn Süßkirsche bis Blühende Apfel), 1971–2000 und 2011–2100	26
Abb. 18a	Potentieller Bienenflug im Jahr, alle Stationen	27
Abb. 18b	Potentieller Bienenflug zur Hauptblüte, alle Stationen	27
Abb. 18c	Potentieller Bienenflug zur Obstblüte, alle Stationen	27
Abb. 19	Mittlerer potentieller Bienenflug 2006–2100	28

Abb. 20	Mittlerer potentieller Bienenflug zur Hauptblüte 2006–2100	29
Abb. 21	Mittlerer potentieller Bienenflug zur Obstblüte 2006–2100	30
Abb. 22	Mittlerer Honigertrag aller Zuchtstationen in Hessen und in Deutschland von 1970–2017	32
Abb. 23	Anbaufläche für Raps in Hessen für die Jahre 1970–2017	33
Abb. 24	Mittlerer Honigertrag pro Volk in Kilogramm (oben) und Anzahl der Völker in der Stichprobe (unten) nach Zuchtstellen (ZST)	35
Abb. 25	Mittlerer Honigertrag in kg/Volk an sieben Zuchtstellen (2006–2017)	36
Abb. 26	Mittlerer Honigertrag in kg/Volk an sieben Zuchtstellen und dazugehöriger potentieller Bienenflug im Jahr (2006–2017)	36
Abb. 27	Mittlerer Honigertrag in kg/Volk an sieben Zuchtstellen und dazugehöriger potentieller Bienenflug in der Hauptblüte (2006–2017)	37

Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Chilling-Forcing-Modell für den Blühbeginn von Hasel in Hessen	22
Tab. 2	Chilling-Forcing-Modell für den Blühbeginn der Sommerlinde in Hessen	23
Tab. 3	Mittlere Lufttemperatur für das Jahr, die Hauptblüte und Obstblüte, jeweils für die Szenarien RCP 2.6 und RCP 8.5 und die Zeiträume Z0 und Z3	24
Tab. 4	Übersicht über die verwendeten Datensätze zum Honigertrag	34

1. Einleitung und Hintergrund

Für die westliche Honigbiene (*Apis mellifera*) sind Witterungsbedingungen und Trachtverfügbarkeit, neben Faktoren wie züchterischer Eigenschaften und Gesundheit eines Volkes, ein zentraler Faktor für die Flugaktivität und damit für Bestäubungsleistung und Honigertrag (POLATTO ET AL., 2014). Die Einflüsse der zentralen Wetterelemente Lufttemperatur, Globalstrahlung, Niederschlagshöhe und Windgeschwindigkeit sind hierbei gut erforscht und dokumentiert (SZABO, 1980). So benötigen Honigbienen ausreichendes Licht und Lufttemperaturen zwischen 12 °C und 35 °C um zum Sammelflug auszuschwärmen. Niederschläge und starker Wind verhindern das Sammeln. In Hessen wurde im Vergleich der Periode 1951–1980 zu 1981–2010 eine Steigerung der Lufttemperatur von 0.6 K nachgewiesen (HLNUG, 2016). Regionalisierte Klimaszenarien prognostizieren einen weiteren Anstieg von im Mittel 3.9 K für den Zeitraum 2071–2100 im Vergleich zur Referenzperiode 1971–2000 (REKLIES).

Die Auswirkungen dieser klimatischen Veränderungen der letzten Jahrzehnte auf die Pflanzenentwicklung, insbesondere im Frühjahr, sind deutlich erkennbar: So betrug beispielsweise die Verfrühung des Blühbeginns relevanter Obstgehölze (Apfel, Süßkirsche, Sauerkirsche, Birne) in Deutschland seit 1961 im Mittel ca. 3 Tage pro Jahrzehnt.

Das Modell BIENE des DWD (FRIESLAND, 1998) ermöglicht die Einteilung von Stunden nach ihrer (wetterbedingten) Eignung zum Bienenflug (gar nicht, schlecht, mäßig, gut), sowie die Berechnung einer Kennzahl für den potentiellen Bienenflug für frei gewählte Zeiträume. Dieses rein witterungsgetriebene Modell eignete sich jedoch nicht zur Beurteilung des Bienenflugs im ganzen Jahr, da entscheidende Parameter keine Rolle spielen, insbesondere nicht die Phänologie der Trachtpflanzen.

Ziel dieser Studie war es, anhand von experimentell erfassten Daten zum Flug von Bienenvölkern das Modell BIENE weiterzuentwickeln und zu validieren. Hierzu wurde insbesondere die Phänologie der Trachtpflanzen untersucht und in das Modell integriert. Darüber hinaus wurde geprüft, ob ein statistisches Modell für den witterungsbedingten Jahresertrag von Honig entwickelt werden kann, um so eine Beziehung zwischen dem Bienenflug und dem Honigertrag aufstellen zu können.

Weiterführend wurde, unter Berücksichtigung der Blütezeiten relevanter Pflanzenarten (Haselnuss, Apfel, Süßkirsche, Linde), der potentielle Bienenflug für heutige und für veränderte klimatische Verhältnisse auf der Basis von Klimaszenarien berechnet.

Fragestellungen für das Projekt waren:

- Wie hoch ist der potentielle Bienenflug für heutige und veränderte klimatische Verhältnisse in Hessen?
- Wie verändert sich die Phänologie wichtiger Trachtpflanzen unter veränderten klimatischen Verhältnissen?
- Ergibt sich eine Desynchronisation zwischen der Blüte von Trachtpflanzen und dem potentiellen Bienenflug?
- Verlängert sich auf Grund des Klimawandels die trachtfreie Zeit der Bienen?
- Welche potentiellen Veränderungen gibt es im Honigertrag für veränderte klimatische Verhältnisse?

Hierzu wurden zuerst Daten zu Bienenflug, Wetter und Trachtpflanzenphänologie für die Jahre 1951–2015 untersucht und in Beziehung gestellt. Danach konnte das bestehende Modell BIENE mit Daten des Fachzentrums Bienen und Imkerei in Mayen kalibriert, durch die Einführung phänologischer Kennphasen erweitert und an zwei weiteren Standorten mit Daten des HOBOS-Projekts validiert werden. Um die Verwendung des überarbeiteten Modells für veränderte klimatische Verhältnisse (Klimaszenarien) nutzen zu können, wurden für vier relevante Trachtpflanzen phänologische Modelle entwickelt. Daraufhin wurde mit diesen gekoppelten Modellen der potentielle Bienenflug in den Jahren 2007–2100 für die Klimaszenarien RCP 2.6 und 8.5 für drei globale Klimamodelle an sechs Standorten in Hessen berechnet und ausgewertet.

Für die Untersuchung des Zusammenhanges zwischen Witterung und Honigertrags konnten neben den Mittelwerten über Hessen jährliche Daten von 7 Züchtern/innen der Jahre 1971 bis 2017 verwendet werden. Für diese Standorte wurde ebenfalls jeweils der potentielle Bienenflug ermittelt und mit den Honigerträgen in Beziehung gesetzt.

2. Entwicklung des Bienenflugmodells

Das erste Arbeitspaket befasste sich mit der Validierung und Verfeinerung eines Modells, mit dem der potentielle Bienenflug und damit die Bestäubungsleistung von Honigbienen untersucht und dargestellt werden kann.

2.1 Modellgrundlage

Die Wetterelemente Lufttemperatur, Globalstrahlung, Niederschlagshöhe und Windgeschwindigkeit haben unterschiedlichen Einfluss auf den Bienenflug. Um zum Sammelflug auszuschwärmen benötigen Honigbienen Lufttemperaturen zwischen 12 °C und 35 °C und ausreichendes Licht zur Orientierung (Globalstrahlung > 200 W/m²). Niederschlagsereignisse ab einer Intensität > 2.4 mm/h verringern die Bienenaktivität bereits um 80%, ebenso wie Windgeschwindigkeiten > 3 m/s.

Als Modellgrundlage wurde das Modell „Biene“ des DWD (FRIESLAND 1998) verwendet, das für das Projekt CHARIKO (BLÜMEL & CHMIELEWSKI, 2013) freundlicherweise zur Verfügung gestellt und dort neu programmiert wurde. Es basiert auf stündlichen Werten der Globalstrahlung, Lufttemperatur, Niederschlagshöhe und Windgeschwindigkeit und berechnet daraus die Anzahl der Stunden ohne, mit schlechten, mit mäßigen und mit guten Flugbedingungen für Bienen. Aus diesen Ergebnissen ergibt sich letztlich der Wert des potentiellen Bienenflugs pro Tag¹. Abbildung 1 zeigt beispielhaft die Modellergebnisse für die Jahre 2013 und 2014. Die bis in den April dauernde Kälteperiode im Jahr 2013 ist deutlich zu erkennen und zeigt einen im Vergleich zu 2014 verzögerten Flugbeginn.

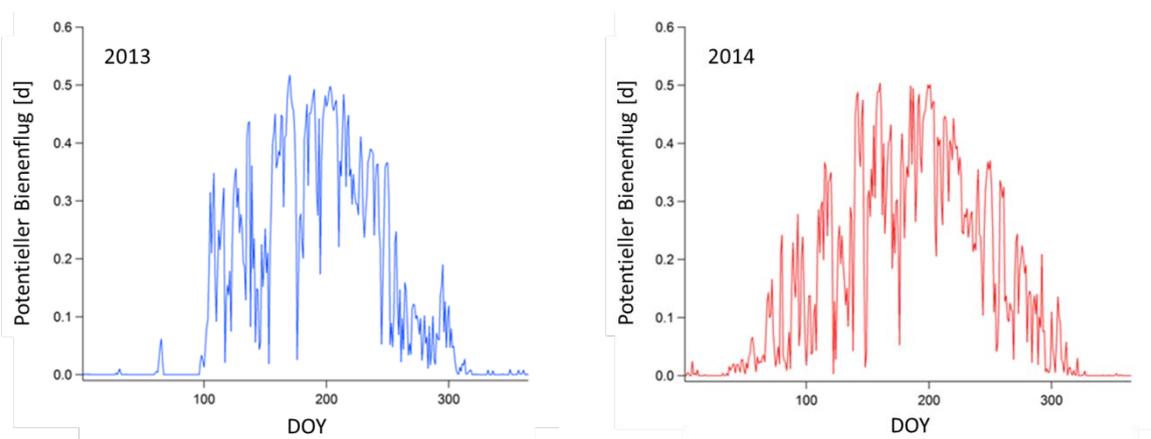


Abb. 1: Potentieller Bienenflug in den Jahren 2013 und 2014, berechnet mit dem Modell „Biene“ aus Wetterdaten der Station Berlin-Dahlem

¹ Eine genaue Beschreibung der Modellparameter und der Wichtungen findet sich im Abschlussbericht des Projekts CHARIKO (BLÜMEL & CHMIELEWSKI, 2013)

Bisher beschreibt das Modell allerdings nur den potentiellen Bienenflug aufgrund der Witterungsbedingungen. Der reale Bienenflug hängt jedoch von weiteren Faktoren ab, wie beispielsweise die Volksstärke, Krankheiten oder Königinnenverlust. Insbesondere im Frühjahr kommt es außerdem zu einer verzögerten Aktivitätssteigerung, da das Volk nach der Winterruhe Zeit zur Entwicklung benötigt. So zeigt der abrupte Anstieg des Bienenflugs im Jahr 2013 (Abb. 1) nur die potentielle, witterungsbedingte Aktivität, nicht aber den Anstieg der Aktivität durch den Beginn der Brut. Ziel war es daher, einen Verzögerungsfaktor für den Flugbeginn in das Modell zu implementieren. Weiterhin sollten die Folgen eines möglichen Temperaturanstiegs im Winter mit verstärktem Bienenflug, jedoch ohne Tracht untersucht werden.

Hierzu wurden Modellläufe für den Standort Mayen für die Jahre 2008–2015 gerechnet und mit den Daten der im Folgenden dargestellten Versuche verglichen. Außerdem wurde der Modeloutput modifiziert, um neben den bisher ausgegebenen Tageswerten auch die modellintern berechneten Stundenwerte nutzen zu können.

2.2 Kalibrierungs- und Validierungsdaten für das Bienenflugmodell

Experimentelles Vorgehen

Für die Verifizierung und Modifizierung des Bienenflugmodells werden Daten zur Flugaktivität von Bienen in Abhängigkeit vom Wetter benötigt. Es gibt eine Vielzahl von Methoden, die eine Beobachtung von Bienen ermöglicht: kameragestützte Verfahren, Verfolgung einzelner Bienen per Radio-Frequency-Identification-Chip (RFID-Chip) oder sensorgestützte Langzeitmessungen etwa von Gewicht, Gaszusammensetzung, Temperatur oder Geräuschen im Bienenstock (MEIKLE & HOLST, 2014). In der vorliegenden Studie wurde eine Messmethode gewählt, zu der bereits Erfahrungen vorliegen, die recht robust ist und für die eine langjährige Datenverfügbarkeit gewährleistet ist. Am Fachzentrum für Bienen und Imkerei in Mayen wurde von Juni 2007 bis August 2015 ein durchgehender BeeScan-Versuch mit vier Beuten durchgeführt. Der BeeScan der Marke Lowland-Electronics (Abb. 2) besteht aus einem Aufsatz mit 32 Tunneln, der direkt an der Beute vor dem Flugloch angebracht wird. Jeder dieser Tunnel ist groß genug für maximal eine Biene und enthält zwei hintereinanderliegende Lichtschranken, durch die nicht nur die Anzahl der passierenden Bienen, sondern auch deren Bewegungsrichtung festgestellt werden kann (STRUYE ET AL., 1994).



Abb. 2: BeeScan an einer Beute in Berlin-Dahlem

Vorteile der Methode sind die Einfachheit und Robustheit des Geräts. Andere Methoden ermöglichen nicht das ganze Volk zu beobachten, sondern nur einzelne Bienen (RFID-Chip) und – da Bienen in der Saison nur etwa sechs Wochen leben – keine Langzeitbeobachtungen. Kammergestützte Beobachtung haben den Vorteil, keinerlei Eingriff an der Beute vorzunehmen, allerdings sind diese Methoden, vor allem bei der Bildauswertung noch nicht ausgereift, um im Versuch verwendet zu werden (MEIKLE & HOLST, 2014). Nach unseren Erfahrungen, schienen die Bienen, nach kurzer Eingewöhnungszeit, den BeeScan gut anzunehmen.

Nachteile sind der Eingriff am Flugloch der Bienen, der dieses etwas verkleinert. Die Gefahr besteht darin, dass es bei starken Völkern zu einem Stau am Flugloch kommen kann. Bisher lässt sich in den Daten allerdings kein Indiz dafür finden. Datenlücken von ein bis zwei Wochen können außerdem infolge einer Varroa-Behandlung mit Ameisensäure entstehen, da es – je nach Wetterlage und imkerlicher Praxis – während dieser Zeit nötig sein kann, das Flugloch komplett zu öffnen, um die Belastung für die Bienen so gering wie möglich zu halten. Zusätzlich ist es für den BeeScan nicht möglich zu erkennen, welche Bienen die Beute verlassen um auf Sammelflug zu gehen und welche sich zur Orientierung oder als Wache nur auf dem Abflugbrett aufhalten. Durch Beobachtung und manuelle Zählung der abfliegenden Bienen kann dieser Fehler jedoch korrigiert werden. GARY (1967) und STRUYE ET AL. (1994) erfassen bei einem Flight-Cone-Test (Anbringen eines sich verengenden Drahttrichters am Flugloch zur leichteren Zählung der abfliegenden Bienen) einen Anteil von etwa 70 % abfliegender Bienen. Weiterhin kann es zu einer zu geringen Schätzung der passierenden Bienen kommen, wenn zwei Bienen zu nah hintereinander die Lichtschranke passieren und damit als eine Biene gezählt werden (Abstand <1mm).

Für die Validierung des Modells wurden uns freundlicherweise Daten des HOBOS-Projekts der Universität Würzburg zur Verfügung gestellt (HOBOS, 2017). Es handelt sich hierbei um Bienenflugdaten aus Würzburg (1 Volk, 5 Jahre) und Bad Schwartau (1 Volk, 1 Jahr), erhoben ebenfalls mit dem BeeScan der Marke Lowland Electronics sowie eigener Technik mit gleicher Funktionsweise.

2.3 Kalibrierung des Bienenflugmodells

Die Datenreihe aus Mayen besteht aus 5-minütigen Ein- und Ausflugzählungen, zwischen dem 16.8.2007 und dem 16.6.2015. Der Prozentsatz an fehlenden Messungen liegt zwischen 0.3 % in 2015 und 12.2 % in 2010. Im Mittel liegt der Anteil der Fehlwerte bei 5.6 %.

Bei der Aggregation der Daten auf Stundenwerte wurden maximal drei aufeinanderfolgende Fehlwerte durch lineare Interpolation ergänzt, bei einer höheren Anzahl fehlender Werte wurde der betreffende Stundenwert als fehlend belassen. Bei der Aggregation der Stunden- auf Tageswerte wurden ausschließlich einzelne fehlende Werte interpoliert, bei mehr fehlenden Werten wurde der komplette Tag auf NA gesetzt.

Das gleiche Verfahren wurde bei den Wetterdaten angewandt. Hier lag der Anteil der nicht erfassten Daten allerdings deutlich niedriger, im Mittel bei 0.1 %.

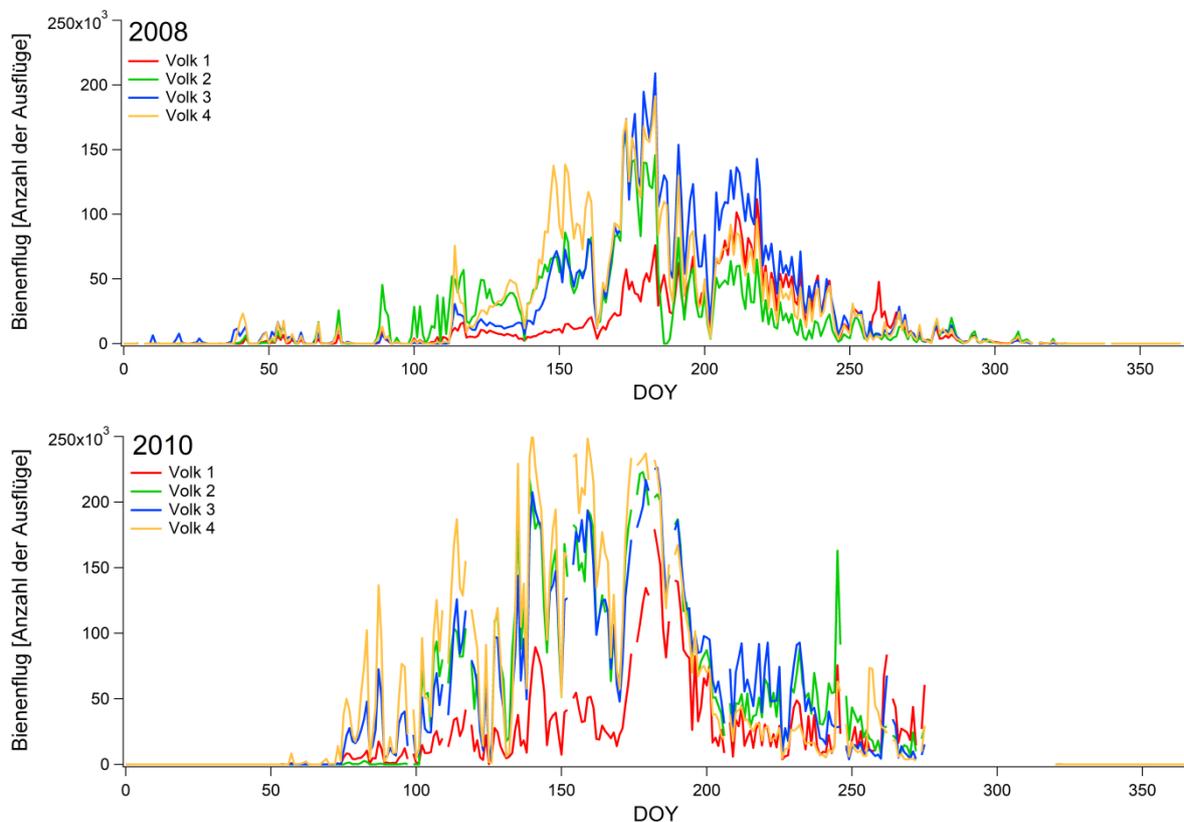


Abb. 3: Bienenflug an vier Völkern in Mayen 2008 und 2010

Grundsätzlich zeigen sich in den beiden dargestellten Jahren große Ähnlichkeiten in der zeitlichen Variabilität des Bienenflugs zwischen den 4 Bienenvölkern (Abb. 3). Unterschiede werden hauptsächlich in den Absolutwerten deutlich. Hierbei dürfte vor allem die unterschiedliche Stärke der Völker eine Rolle spielen. Zudem ist zu erkennen, dass sich die Völker teilweise unterschiedlich entwickeln. So zeigt Volk 2 am Anfang der Saison 2010 die geringsten absoluten Zahlen bis zum Tag 100, holt jedoch danach deutlich auf. Volk 1 startet langsam und erreicht erst spät das Niveau der anderen drei Völker. Volk 1 benötigt nach dem Einbruch kurz

vor Tag 150 deutlich länger um wieder auf sein vorheriges Niveau zu gelangen, übersteigt dieses dann allerdings und schließt auf das Niveau der anderen Völker auf. Dies ist nicht ungewöhnlich, beispielsweise durch den Verlust der Königin, was zu einer Verzögerung in der Eiablage und Brut führt oder zum Schwärmen eines Teils des Volkes. Eine junge Königin könnte die deutlich stärkere Brutleistung ab Tag 170 erklären. Dieser Zusammenhang lässt sich statistisch im Bienenflug nachweisen: Die Korrelation zwischen den Bienenflugdaten der einzelnen Völker liegt in den Jahren 2008 und 2010 konstant über $r=0.85$. In anderen Jahren sind neben großen Differenzen in den Absolutwerten leider auch größere Datenlücken vorhanden (Abb. 4). Die Daten von Volk 1 und 4 wurden deshalb nicht betrachtet.

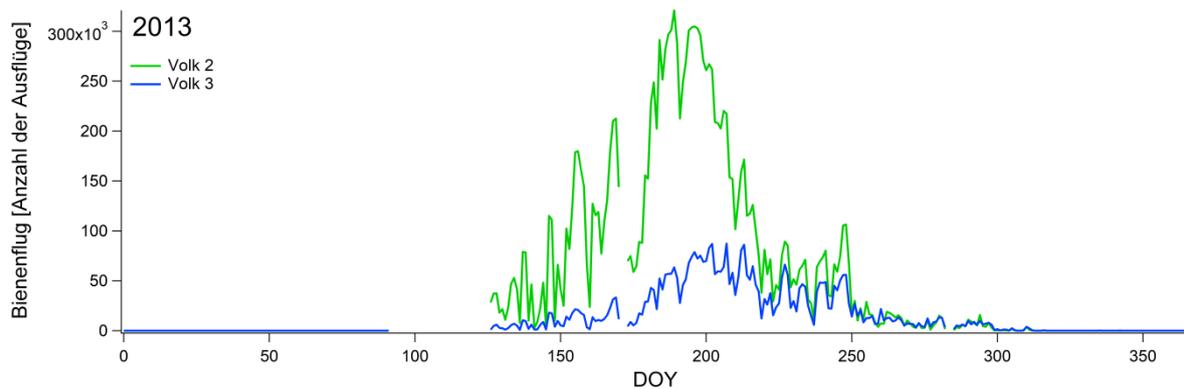


Abb. 4: Bienenflug von zwei Völkern in Mayen 2013 mit erkennbarer Datenlücke von April bis Mai. Zwei weitere Völker weisen noch größere Datenlücken auf und sind nicht dargestellt.

Für die Weiterentwicklung des Bienenflugmodells ist diese Erkenntnis von Bedeutung, da hiermit eine deutliche Abhängigkeit des Bienenflugs von externen Einflüssen erkennbar wird, die über verschiedene Völker vergleichbar ist. Da hier die imkerliche Praxis sowie die Verfügbarkeit von Nektar, Pollen und Wasser für alle Völker identisch sind, lassen sich die Daten hervorragend für die Modellierung des Bienenflugs in Abhängigkeit von den Witterungsbedingungen nutzen.

Um eine bessere Vergleichbarkeit der Datensätze untereinander herzustellen, erfolgte eine Normierung des Bienenflugs auf die jeweilige höchste Flugrate.

Der Vergleich der Modellläufe mit den experimentellen Daten zeigt bereits eine starke Korrelation von Werten zwischen $r=0.71$ und $r=0.95$ (signifikant für $\alpha=0.01$, Abb. 5). Die witterungsbedingte Variabilität des Bienenflugs kann vom Modell besonders im Frühjahr und Frühsommer hervorragend abgebildet werden. Deutlich erkennbar ist, dass das Modell bis zu dieser Version ausschließlich Witterungsparameter berücksichtigt. So ist das bereits im vorherigen Kapitel betrachtete Problem, dass das Modell bei hohen Temperaturen im Winter bereits vor Blühbeginn und Volksentwicklung Bienenflug anzeigt, gut erkennbar. Ebenfalls in den experi-

mentellen Daten sichtbar und vom Modell nicht abgebildet ist ein deutlicher Abfall des Bienenflugs im Spätsommer und Herbst. Das Modell überschätzt hier deutlich den Bienenflug, der durch das stark verminderte Trachtangebot und den natürlichen Jahresgang des Bienenvolks deutlich verringert ist.

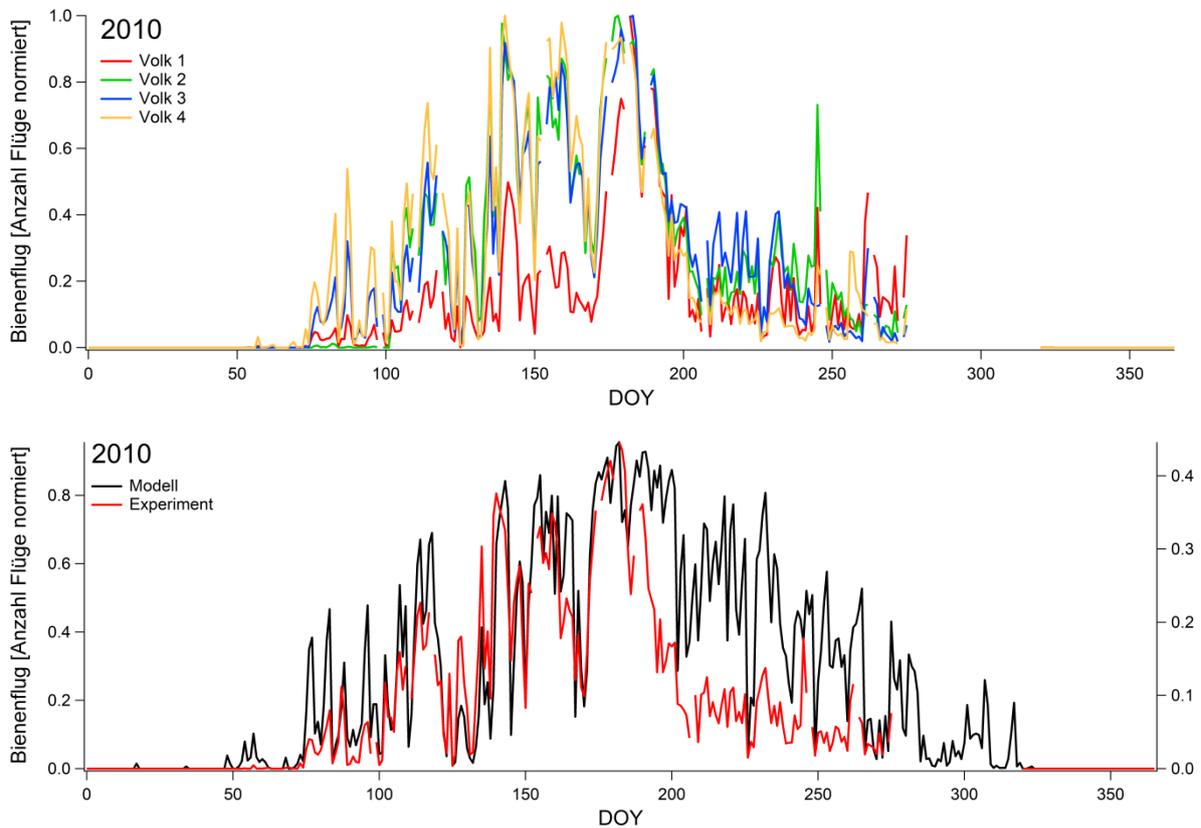


Abb. 5: Bienenflug (normiert), Mayen 2010, alle vier Völker (oben), sowie der mittlere Bienenflug im Vergleich mit dem Modellergebnis (unten).

Um das Trachtpflanzenangebot in die Modellierung einzubeziehen, wurden relevante Trachtpflanzen anhand ihrer phänologischen Phasen betrachtet und auf ihre mögliche Integration in das Modell untersucht.

2.4 Phänologie relevanter Trachtpflanzen

Ein weiteres Arbeitspaket des vorliegenden Projekts betraf die Analyse der Blühzeiten relevanter Trachtpflanzen und ihre Synchronisation bzw. mögliche, künftige Desynchronisation mit den Zeiten maximalen Bienenflugs bei Honigbienen in Hessen. Deshalb wurden zunächst die wichtigsten Trachtpflanzen untersucht. Bei der Bewertung der Trachtpflanzen erfolgte eine Einteilung in Pollen- und Nektarwert, sowie eine Gesamtbewertung (BIENENINSTITUT KIRCHHAIN 2003). Um eine Versorgung der Bienen mit Nektar und Pollen über die ganze Bienen-saison zu gewährleisten, war der Blütezeitpunkt ein wichtiger Faktor. Weiteres Kriterium bei der

Pflanzenauswahl waren landwirtschaftliche Relevanz, Datenverfügbarkeit und -verbreitung. Folgende Pflanzen wurden betrachtet:

- Entwicklungstracht: Salweide, Hasel, Wildkirsche
- Frühtracht: Apfel, Süßkirsche, Rosskastanie, Raps
- Frühsommertracht: Kastanie, Robinie
- Sommertracht: Linde

Für die Bestäubung im Obstbau und in der Landwirtschaft sind hiermit die wichtigsten Zeiträume abgedeckt, insbesondere das Frühjahr. In der Bienenhaltung ist jedoch die Sommer- und Herbstaufbautracht (etwa ab der Sommersonnenwende) eine zweite, äußerst wichtige Phase im Bienenjahr, da hier am häufigsten Trachtlücken entstehen. Nach der Lindenblüte als letzte Massentracht ist nur noch die sogenannte „Läppertracht“ vorhanden, also eine Vielzahl an unterschiedlichen (Garten-) Blumen und Sträuchern, zu denen wenig phänologische Daten vorliegen. An dieser Stelle sind weitere Untersuchungen notwendig, um auch die Vorbereitungen für die Winterruhe zu berücksichtigen.

Bisher zeigt sich in Hessen bei allen untersuchten Trachtpflanzen der bereits bekannte Trend zu einer Verfrühung des Blühbeginns um das Jahr 1990 (Abb. 6).

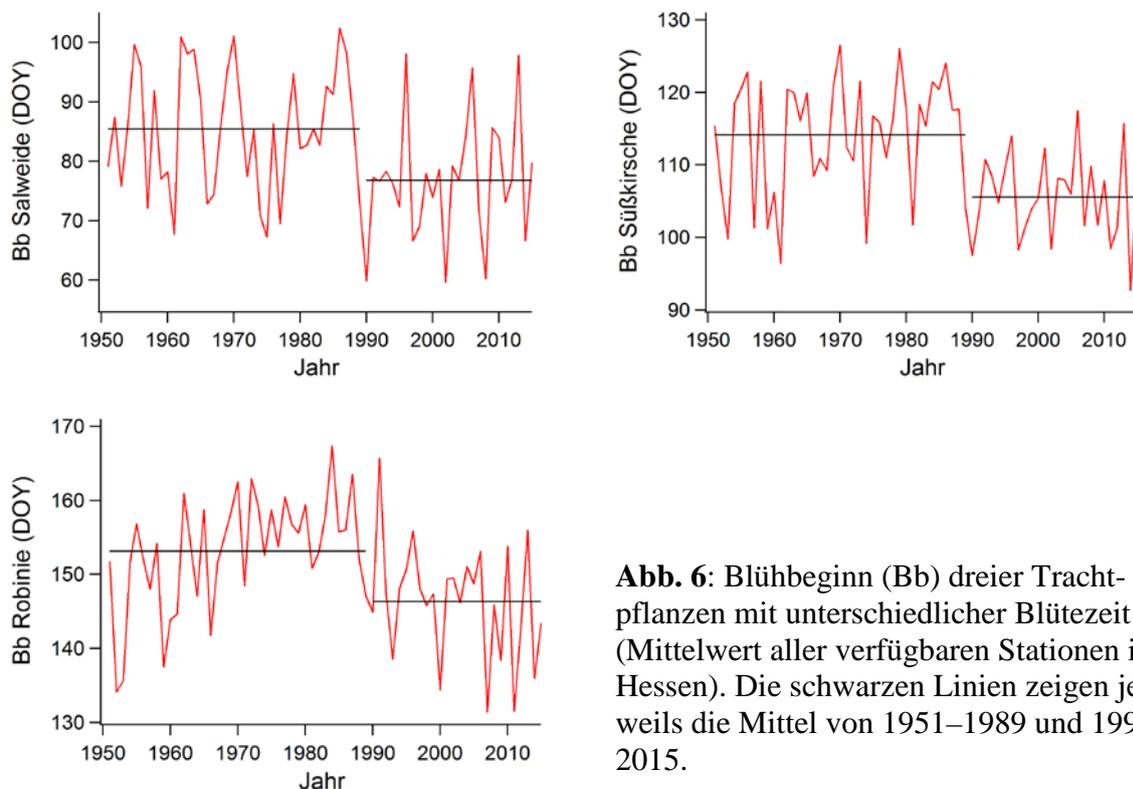


Abb. 6: Blühbeginn (Bb) dreier Trachtpflanzen mit unterschiedlicher Blütezeit (Mittelwert aller verfügbaren Stationen in Hessen). Die schwarzen Linien zeigen jeweils die Mittel von 1951–1989 und 1990–2015.

Hierbei zeigten zwei phänologische Phasen besonderen Einfluss auf die Modellgüte: Beginn der Haselblüte (als Startpunkt des Bienenflugs) und Ende der Blüte der Winterlinde (Ende der

Massentracht und Wintervorbereitung des Volks). Aufgrund geringer Datenverfügbarkeit für die Winterlinde wurden die Berechnungen mit der phänologischen Kennphase „Blühbeginn Sommerlinde“ plus 21 Tage durchgeführt. Dieser Abstand ergibt sich aus der Untersuchung des Beginns der Blühzeiten von Sommer- und Winterlinde (Daten des Deutschen Wetterdienstes, im Mittel 7 Tage) und der durchschnittlichen Blühdauer der Winterlinde (14 ± 2 Tage).

Weiterhin wurden zur Untersuchung des Bienenflugs zur Obstblüte die phänologischen Phasen „Beginn der Kirschblüte“, sowie „Ende der Apfelblüte“ in die weiteren Berechnungen aufgenommen. Die quantitativ nicht ausreichenden Daten zur Apfelblüte konnten in einem ähnlichen Verfahren wie bei der Winterlinde durch die Phase „Blühbeginn der Birne“ plus 14 Tage ersetzt werden (Berechnungen aus den Daten des DWD).

2.5 Erweitertes Bienenflugmodell und Validierung

Um das Modell an die experimentellen Daten anzupassen, wurde ein Dämpfungsfaktor (Phänologischer Faktor FakP) in das Modell implementiert. Im Zeitraum vor Blühbeginn der Hasel und nach Eintritt des Spätherbstes (DOY 320) unterdrückt dieser Faktor jegliche Bienenaktivität, da keine Nahrungsquellen vorhanden sind (Gleichung 1a). Zwischen dem Blühbeginn der Hasel und dem Blühende der Winterlinde ist keine Dämpfung nötig (Gleichung 1b). Um die graduelle Dämpfung des Bienenflugs zwischen Blühende der Winterlinde und dem Eintritt des Spätherbstes zu berechnen, wurde ein exponentielles Modell an die experimentellen Daten angepasst (Gleichung 1c), anhand dessen für jeden Tag der phänologische Faktor ermittelt wird.

$$FakP_{DOY < BB_{Hasel} \vee DOY \geq 320} = 0 \quad \text{Gleichung 1a}$$

$$FakP_{DOY \geq BB_{Hasel} \wedge DOY \leq BE_{Winterlinde}} = 1 \quad \text{Gleichung 1b}$$

$$FakP_{DOY > BE_{Winterlinde} \wedge DOY < 320} = 0.00003 * DOY^2 - 0.0177 * DOY + 3.0922 \quad \text{Gleichung 1c}$$

Abb. 7 zeigt das Modellergebnis im Vergleich mit den experimentellen Daten und den phänologischen Kennphasen. Der Abfall des Bienenflugs nach dem Blühende der Winterlinde ist deutlich erkennbar, ebenso wie die verfrühte Modellaktivität vor Beginn der Haselblüte.

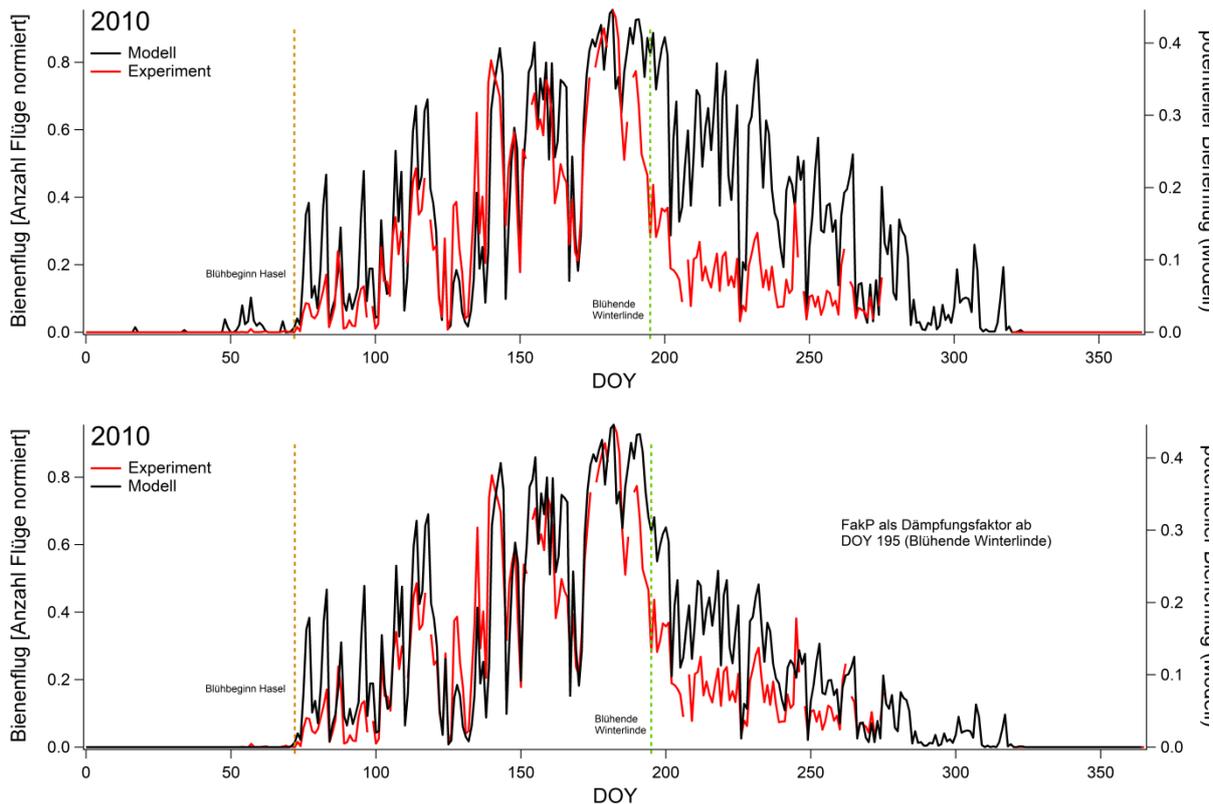


Abb. 7: Normierter mittlerer Bienenflug aus dem Experiment Mayen 2010 (rot) sowie das Modellergebnis (schwarz) ohne und mit Phänologischem Faktor FakP. Die gestrichelten Linien zeigen die Stichtage Blühbeginn Hasel und Blühende Winterlinde.

Der eingeführte Phänologische Faktor führt zu einer deutlichen Verbesserung der Modellgüte. Der verfrühte Peak des Modells wird verhindert, und die gelungene Dämpfung im Spätsommer und Herbst ist deutlich erkennbar.

Validierung

Zur Validierung des Modells wurden Bienenflug- und Wetterdaten aus dem HOBOS-Projekt der Universität Würzburg (HOBOS) verwendet. Die Daten lagen als 15-Minuten-Werte vor und wurden wie die Mayener Daten aufbereitet. Verwendete Geräte sind ebenfalls der BeeScan von Lowland Electronics, sowie ein eigenes Gerät mit gleicher Funktionsweise.

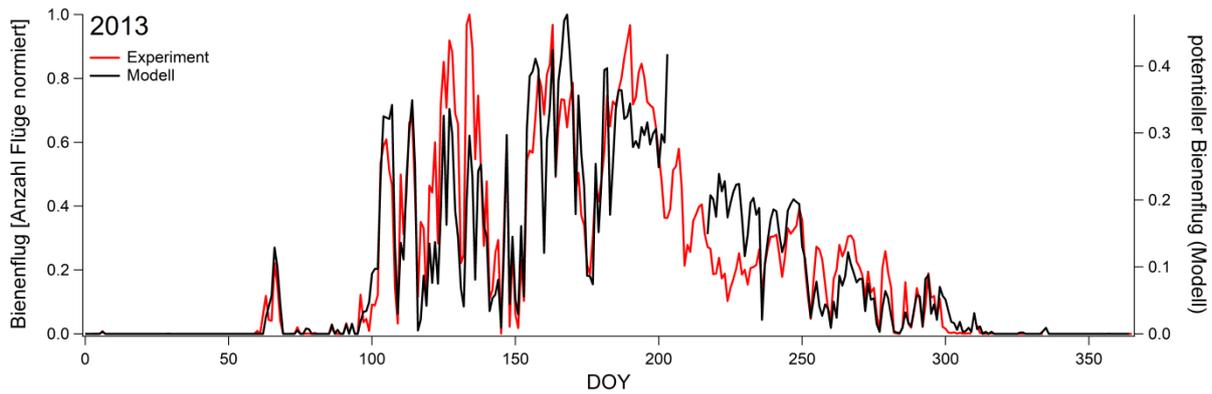


Abb. 8: Modelldaten und experimentelle Daten des Bienenflugs aus Würzburg, 2013

Witterungsbedingte Schwankungen werden vom Modell sehr gut erfasst. Am Beispiel des Würzburger Volkes im Jahr 2013 sind sowohl die Wirkung kalter Temperaturen deutlich erkennbar (Abb. 8, DOY 70–95), aber auch von Tagen mit hohem Niederschlag (DOY 145, 148 und 151). Ebenfalls werden jetzt der Beginn und das Ende des Bienenflugs vom erweiterten Modell gut erfasst. In der Validierung liegt der Korrelationskoeffizient zwischen Modell und Beobachtung zwischen $r=0.79$ und $r=0.86$ (signifikant für $\alpha=0.01$).

Das Modell ist zudem dafür geeignet, menschliche oder sonstige Einflüsse von Witterungseinflüssen zu unterscheiden (Abb. 9). Der experimentell ermittelte Bienenflug zeigt einen deutlichen Einbruch im Mai 2008 (DOY 120), der auf den Einsatz mit dem Neonicotinoid „Clothianidin“ (Insektizid) behandelten und falsch gebeizten Mais-Saatgutes entlang des Rheintals zurückzuführen ist, das massives Bienensterben von Baden Württemberg bis nach Rheinland-Pfalz auslöste (JKI 2008). Derartige Einflüsse bildet das Modell natürlich nicht ab.

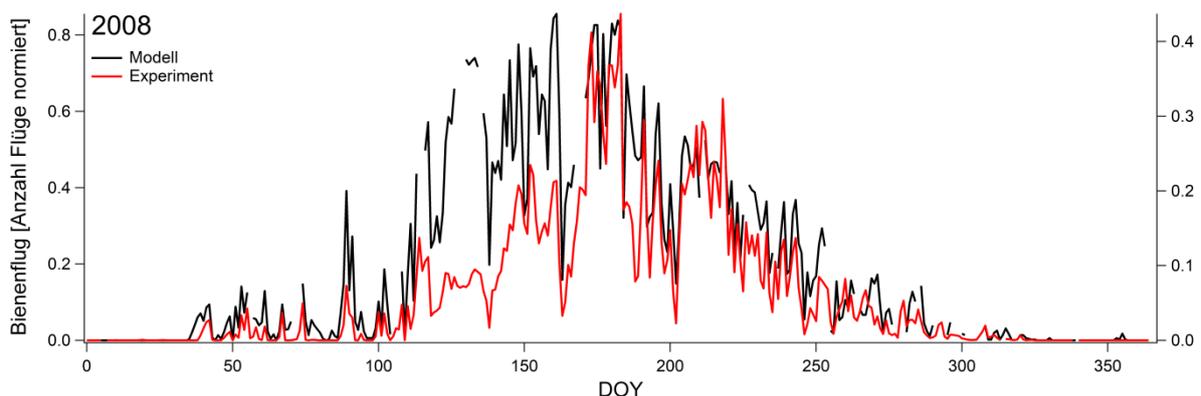


Abb. 9: Modelldaten und experimentelle Daten des Bienenflugs aus Mayen, 2008

3. Potentieller Bienenflug in Hessen 1951–2015

3.1 Auswahl der Stationen und Datengrundlage

Um die Frage zu beantworten, ob rezente oder mögliche zukünftige Klimaänderungen Auswirkungen auf den Bienenflug in Hessen und damit auf die Bestäubung haben, wurden zuerst Berechnungen für fünf Stationen in Hessen für die Jahre 1951–2015 durchgeführt (Abb. 10).

Die Auswahl der Stationen erfolgte zum einen danach, ob eine ausreichend lange und detaillierte Messreihe der vier verwendeten Parameter verfügbar war und zum anderen, ob eine hinreichende Abdeckung der hessischen Naturräume gegeben ist. Da im südlichen Hessen keine den Anforderungen genügende Wetterstation vorhanden war, wurde für die Berechnung des Bienenfluges in dieser Region noch die Wetterstation in Mannheim (Baden-Württemberg) hinzugezogen.

Zur Berechnung des potentiellen Bienenfluges im Zeitraum 1951–2015 wurden für die fünf hessischen Stationen die stündlichen Messwerte der DWD-Stationen zur Lufttemperatur und Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe genutzt. In einzelnen Fällen, in denen die Niederschlagshöhe nicht als Stundenwerte vorlag, wurde jeweils der 24ste Teil der Tagesniederschlagssumme verwendet. Die Globalstrahlung war an keiner Station in Stundenwerten vorhanden. Die stündliche Globalstrahlung wurde daher aus der tatsächlichen und maximalen Sonnenscheindauer der Stationen, mit Annahme einer mittleren Trübung, astronomisch aus den Stationskoordinaten berechnet (BLÜMEL & CHMIELEWSKI, 2013) und auf die Tagessumme der Globalstrahlung normiert.

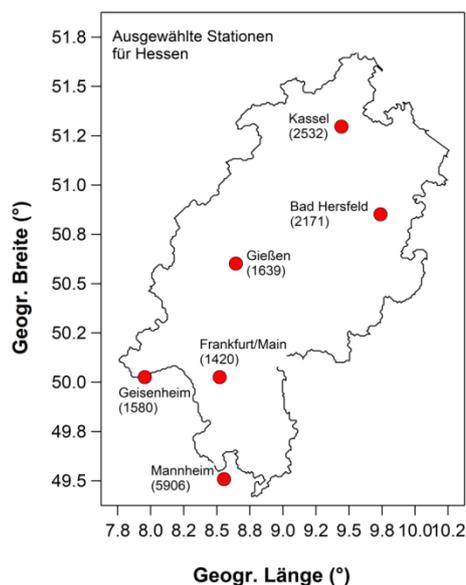


Abb. 10:

Ausgewählte DWD Wetterstationen

3.2 Berechnung des potentiellen Bienenflugs für den Zeitraum 1951–2015

Um eine Vergleichbarkeit der Daten über lange Zeitreihen zu erreichen, wurde eine Aufsummierung des potentiellen Bienenflugs vorgenommen: Die maximal mögliche jährliche Sonnenscheindauer an jedem Ort der Erde (bei sonst wolkenfreiem Himmel) beträgt 4383 Stunden oder 182.625 Tage. Der potentielle Bienenflug liegt je Tag zwischen 0 (kein Bienenflug möglich) und 1 (24 Stunden perfekte Flugbedingungen). Bei sonst bienengeeigneten Bedingungen (optimale Temperaturspanne, kein Niederschlag, kein Starkwind, ausreichendes Trachtangebot) wäre daher ein maximaler jährlicher potentieller Bienenflug von 182 Tagen (oder 183 in Schaltjahren) möglich. Der potentielle Bienenflug wurde hierbei für verschiedene Zeiträume berechnet: pro Jahr, in der Hauptblütezeit (Beginn der Haselblüte bis Ende Winterlinde), sowie während der Obstblüte (Beginn Kirschblüte bis Ende Apfelblüte).

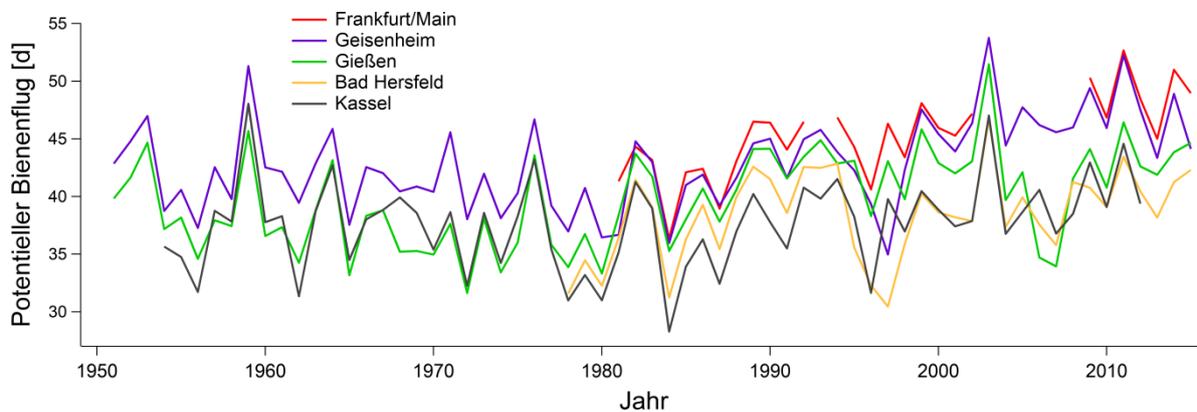


Abb. 11: Akkumulierter jährlicher Bienenflug für fünf hessischen Stationen, 1951–2015

Abbildung 11 zeigt den potentiellen Bienenflug für die fünf hessischen Stationen. Hier zeigt sich ein leichter positiver Trend ab 1990. Absolut zeigen die beiden südlichen Stationen Frankfurt/Main und Geisenheim den stärksten Bienenflug während die beiden nördlichen Stationen Kassel und Bad Hersfeld die niedrigsten Werte zeigen. Das entspricht den Erwartungen, da die Rheinebene mit deutlich milderem Klima eine längere thermische Vegetationsperiode aufweist als die höhergelegenen Bereiche in den hessischen Mittelgebirgen. Deutlich sichtbar ist die hohe Variabilität zwischen den Jahren.

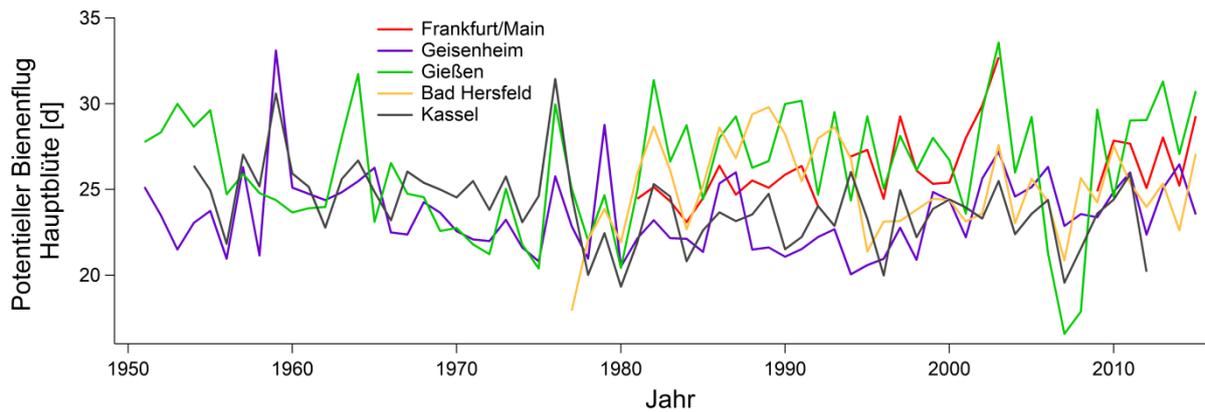


Abb. 12: Akkumulierter Bienenflug für fünf hessischen Stationen zur Hauptblüte (Hasel bis Winterlinde), 1951–2015

Interessant ist, dass im potentiellen Bienenflug während der Hauptblüte (Hasel bis Winterlinde, Abb. 12) kein Trend erkennbar ist. Das bedeutet, dass es vor allem im Spätsommer und Herbst zu gesteigertem Bienenflug kommt (Abb. 11). Auffällig ist hier, dass die absoluten Unterschiede zwischen den Stationen nicht mehr regional differenziert sind.

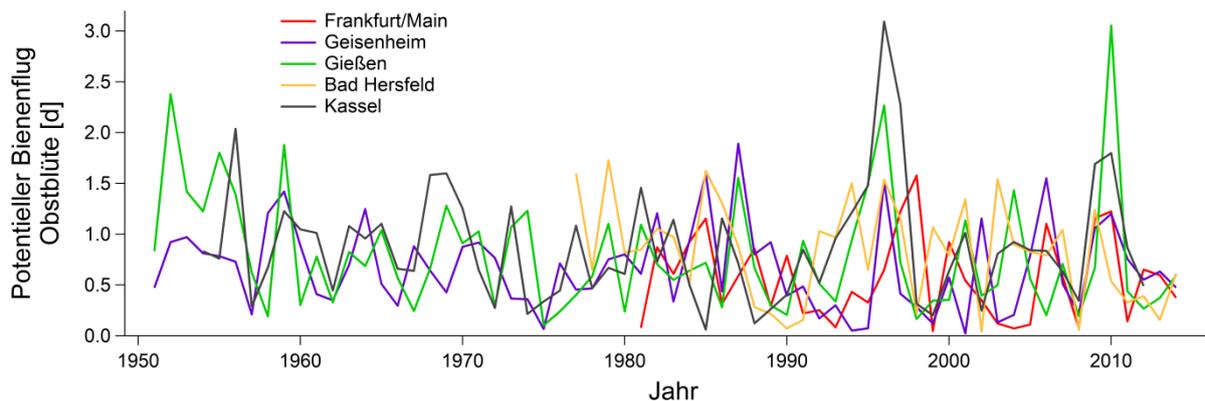


Abb. 13: Akkumulierte Bienenflug für fünf hessischen Stationen zur Obstblüte (Süßkirsche bis Apfel), 1951–2015

Für die Zeit der Obstblüte ist für die letzten 60 Jahre ebenfalls kein Trend erkennbar (Abb. 13). Hier liegen die Stationen dicht beieinander und die Variation zwischen den Jahren ist größer als die Unterschiede zwischen den einzelnen Stationen.

4. Mögliche Veränderungen des potentiellen Bienenflugs 2007–2100

4.1 Auswahl der Klimamodelle

Für die Betrachtung des potentiellen Bienenflugs unter geänderten klimatischen Bedingungen wurden Klimamodellrechnungen des Euro-Cordex-Projekts verwendet (EURO-CORDEX). Da

das Bienenflugmodell eine möglichst feine zeitliche Auflösung benötigt, kamen nicht alle Modellläufe in Frage. Für die ersten Berechnungen wurden die Daten des **MPI-ESM** in der Regionalisierung des Rossby Centre Regional Atmospheric Model (RCA4, SAMUELSSON ET AL., 2011) verwendet. Hier konnten Daten mit einer räumlichen Auflösung von 0.11° (entspricht etwa dem maximalen Flugradius von 10 Kilometern der Honigbiene) sowie einer zeitlichen Auflösung von 3 Stunden bereitgestellt werden. Es wurden die drei Emissionsszenarien RCP 2.6, RCP 4.5 und RCP 8.5 betrachtet. Erweitert wurde die Datengrundlage mit den Modellläufen des **ICHEC-EC-EARTH** und dem **MOHC-HadGEM**, beide GCMs mit der gleichen Regionalisierung, allerdings nur für die Szenarien RCP 2.6 und RCP 8.5. Verwendet wurden jeweils die Gridzelle der Station, sowie die 8 umliegenden Gridzellen, um eine größere Stichprobenanzahl (Repräsentativität) zu gewährleisten.

Grundsätzlich wird für die Abschätzung von Klimafolgen immer die Verwendung eines Ensembles von Klimamodellen empfohlen, um die Unsicherheiten in den Ergebnissen besser abschätzen zu können. Diese Ensembles setzen sich je nach Fragestellung unterschiedlich zusammen. Die einflussreichsten Parameter beim Bienenflugmodell sind Lufttemperatur und Globalstrahlung. Für die Temperatur empfiehlt ReKliEs ein Ensemble aus mindestens 9 zufällig ausgewählten Modellen des ReKliEs-Gesamtensembles (REKLIES 2017). Daher bilden die hier verwendeten Modelle kein vollständiges Ensemble, was an der Verfügbarkeit von Modellrechnungen in stündlicher Auflösung liegt. Allerdings bilden die verwendeten Modelle im Hinblick auf die Lufttemperatur die Bandbreite des ReKliEs-Ensembles ab, da sowohl das Globalmodell mit dem prognostiziert höchsten (HadGEM) als auch das GCM mit den geringsten Temperaturen (EC-EARTH) in die Berechnung eingeht. Die berechneten Temperaturen im Modell MPI-ESM liegen zwischen den anderen beiden Modellen. Die Niederschlagssignale werden, anders als Lufttemperatur und Globalstrahlung, eher von den Regionalmodellen beeinflusst als von den Globalmodellen. Da alle drei verwendeten GCM das gleiche Regionalmodell antreiben liegt hier die größte Unsicherheit. Um die Niederschlagsdaten in Relation zu setzen, wurden sie mit den Ergebnissen des ReKliEs-Projekts verglichen. Hier besteht eine grundsätzliche Tendenz zur Abnahme des Jahresniederschlags und eine Verschiebung in den Winter. Allerdings gibt es hierfür kein robustes Modellensemble.

Da das Bienenflugmodell Stundenwerte benötigt, wurden Temperatur und Windgeschwindigkeit (jeweils am Anfang der 3-Stunden-Werte angegeben) linear interpoliert, während Niederschlag und Globalstrahlung für alle drei Stunden gleich verwendet wurden. Anhand der Validierungsdaten wurde ermittelt, dass diese Aufteilung keine Verschlechterung der Modellgüte zur Folge hat. Das HadGEM-Modell liefert Daten mit einer festen Monatslänge von 30 Tagen. Um diese Daten mit dem von den anderen Modellen genutzten gregorianischen Kalender in Einklang zu bringen, wurde jeder HadGEM-Tag, dessen Nummer ohne Rest durch 72 teilbar

ist verdoppelt, sowie in Schaltjahren außerdem der 58. Tag² dupliziert. Das fehlende Jahr 2100 wurde mit den Daten des Jahres 2098 aufgefüllt.

Für alle betrachteten Zeiträume wurden ebenfalls Untersuchungen zur Veränderlichkeit der Klimaparameter und Trachtpflanzenphänologie durchgeführt.

4.2 Phänologische Modellierung

Um die für den Phänologischen Faktor wichtigen Kennphasen zu bestimmen, wurden phänologische Modelle für den Blühbeginn von Hasel und Sommerlinde berechnet und an Stationsdaten validiert. Ebenso wurden zur Abgrenzung des Zeitraums der Obstblüte Modelle für den Blühbeginn von Süßkirsche und Birne bestimmt. In dieser Studie wurden ausschließlich chilling/forcing (CF)-Modelle berechnet, da die Modelle genutzt wurden, um Verschiebungen im Blühbeginn der Gehölze unter veränderten klimatischen Bedingungen (Klimaszenarien) zu bestimmen³. Der gewählte Modellansatz geht davon aus, dass zur Brechung der Winterruhe der Gehölze (Dormanz) ein pflanzenspezifischer Kältereiz C^* (chilling requirement) erforderlich ist, bevor die Gehölze auf die für ihre Entwicklung förderlichen Temperaturen zum Winterende bzw. im zeitigen Frühjahr reagieren können (sequentieller Ansatz). Der bis zum Blühbeginn der Gehölze erforderliche Wärmereiz F^* wurde in Photo-Thermischen Einheiten (PTU) bestimmt. Diese Methode hat sich bewährt und führte zu einer deutlichen Reduktion des Modellfehlers, vor allem unter wärmeren klimatischen Verhältnissen, die im Falle des Klimawandels auftreten (CHMIELEWSKI & GÖTZ, 2016).

Für die Optimierung der Modellparameter wurden langjährige phänologische Beobachtungen des DWD in Hessen (1951–2015) verwendet (Abb. 10). Die Bestimmung der Modellparameter erfolgte über alle 5 Stationen (Tab. 1, 2, Anhang S. 42), um ein phänologisches Modell für ganz Hessen zu entwickeln. Dieses phänologische Modell für Gesamthessen wurde nachfolgend an den Beobachtungen der Einzelstationen von Hessen validiert (Abb. 14 und 15). Mithilfe dieser Modelle konnten die jeweiligen Stichtage für den Phänologischen Faktor bis zum Jahr 2100 berechnet werden. Ebenso konnte mit diesen Modellen der Zeitraum der Obstblüte für heutige und künftige klimatische Verhältnisse (2011–2100) in Hessen festgelegt werden.

² Siehe auch BLÜMEL & CHMIELEWSKI (2013)

³ Eine genaue Beschreibung der Modellgrundlagen findet sich in BLÜMEL & CHMIELEWSKI (2012) und GÖTZ & CHMIELEWSKI (2016)

Tab. 1: Chilling-Forcing-Modell für den Blühbeginn von **Hasel** in Hessen. C*: Chilling Requirement (Kältebedürfnis) in „Chill Portions“ (CP), T_{BF}: Pflanzenspezifische Basistemperatur, F*: kritische Forcingsumme in „Photo-Thermal-Units“ (PTU), EXPO: Modellparameter abhängig von Pflanzenart und betrachtetem Gebiet, MAE: mittlerer absoluter Fehler des Modells in Tagen (d)

Parameter	C* in CP	T _{BF} in °C	F* in PTU	EXPO (-)	MAE in d
	60.5	1.7	47.6	3.781	7–10

Von den zu modellierenden phänologischen Stadien zeigte der Blühbeginn der Hasel die größte interannuelle Variabilität an den fünf Einzelstationen (s=18–21 d), die von dem Modell gut erfasst wurde (Abb. 14). Ein mittlerer Modellfehler von 7–10 Tagen ist damit für den Blühbeginn der Hasel noch zu rechtfertigen. Der beobachtete Blühbeginn von Sommerlinde, Süßkirsche und Apfel zeigt eine deutlich geringere annuelle Variabilität (7–10 d), wodurch sich der mittlere absolute Fehler der phänologischen Modelle ebenfalls deutlich auf 3–7 Tage reduziert hat.

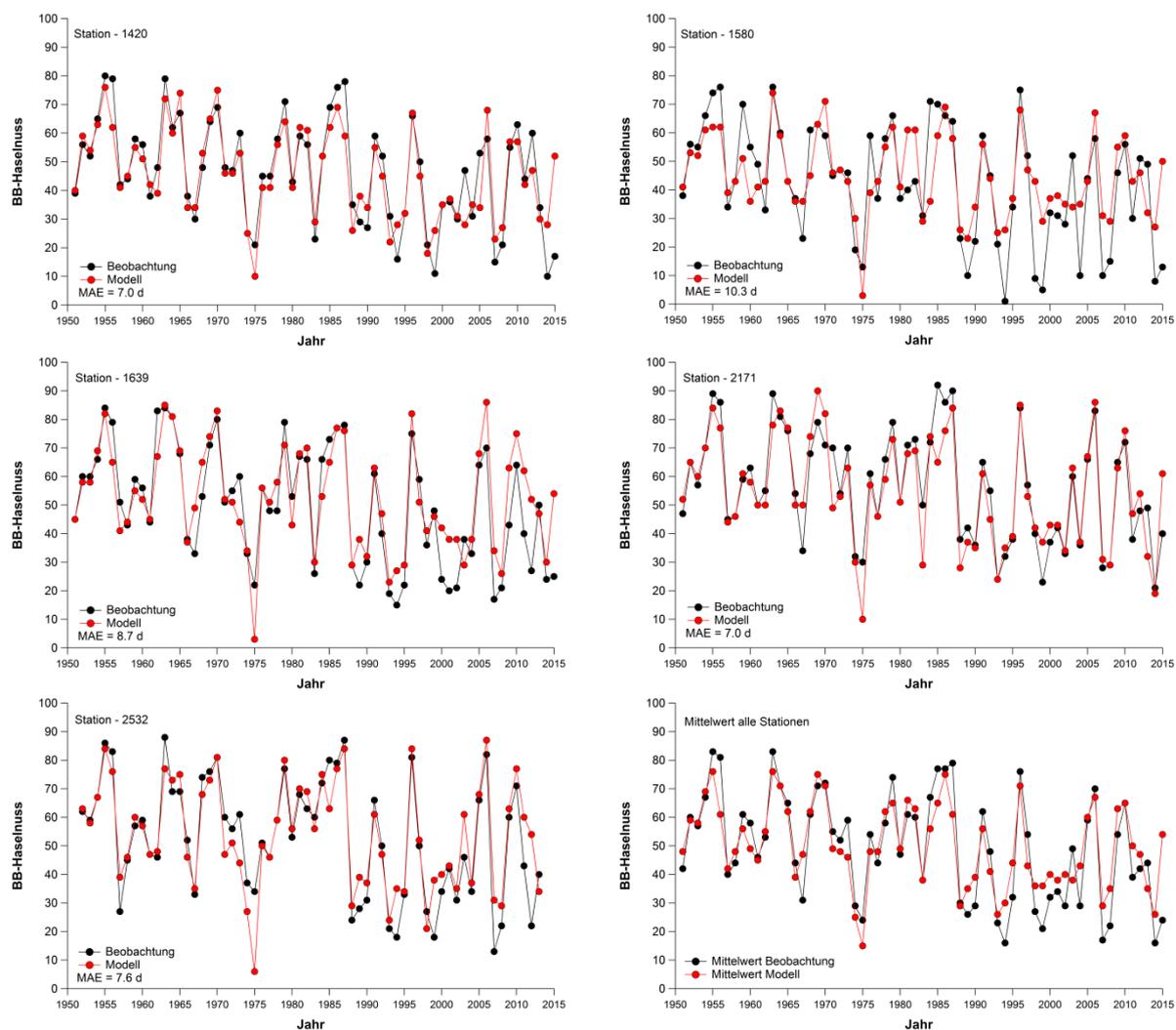


Abb. 14: Validierung des phänologischen Modells für den Blühbeginn von Hasel in DOY an Einzelstationen (s. Abb. 10) und im Stationsmittel, 1951–2015

Tab. 2: Chilling-Forcing-Modell für den Blühbeginn der **Sommerlinde** in Hessen. C*: Chilling Requirement (Kältebedürfnis) in Chill Portions (CP), T_{BF} : Pflanzenspezifische Basistemperatur, F*: kritische Forcingsumme in Photo-Thermal-Units (PTU), EXPO: Modellparameter abhängig von Pflanzenart und betrachtetem Gebiet, MAE: mittlerer absoluter Fehler des Modells in Tagen (d)

Parameter	C* in CP	T_{BF} in °C	F* in PTU	EXPO (-)	MAE in d
	99.8	3.2	990.0	0.474	4–7

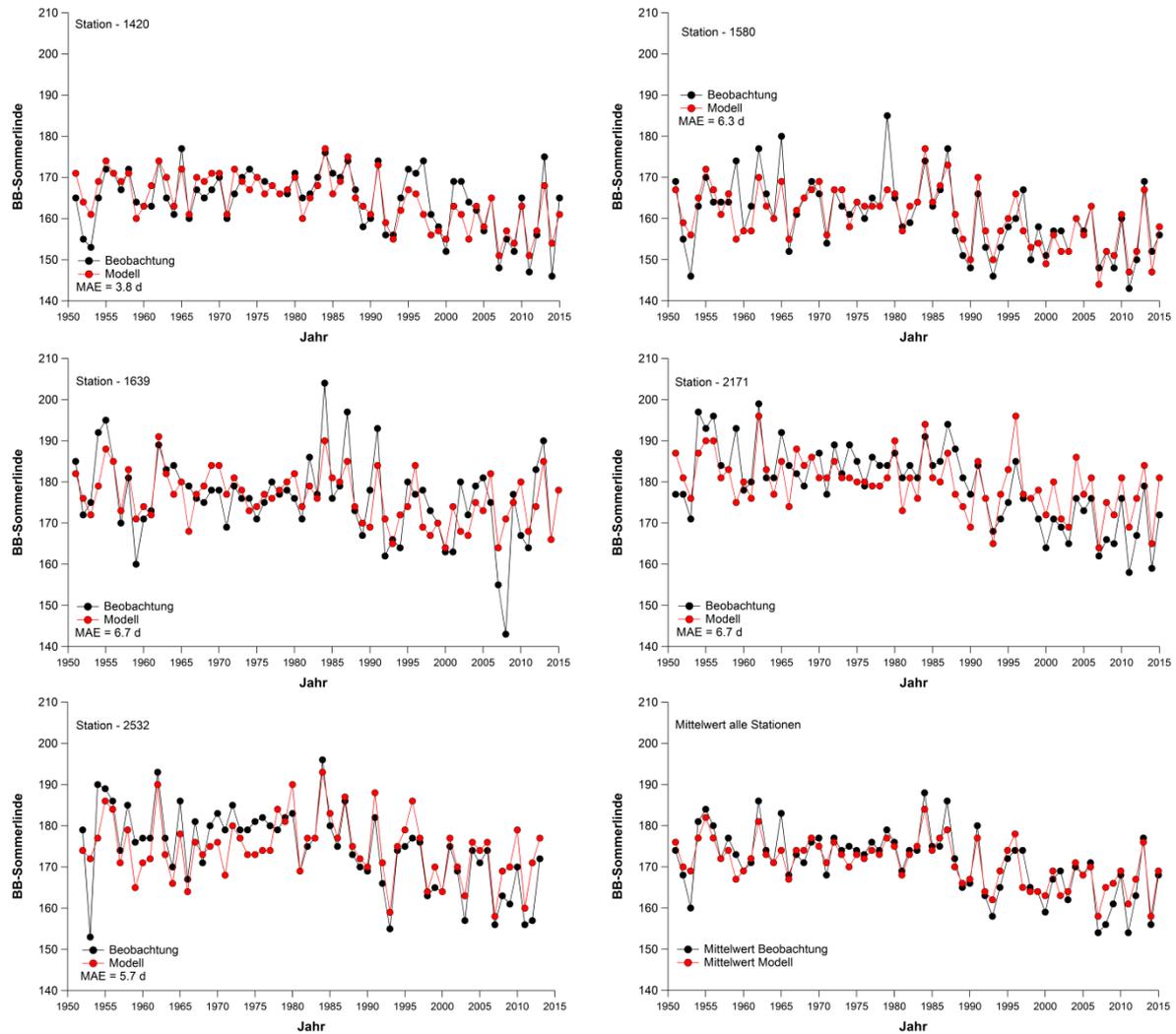


Abb. 15: Validierung des phänologischen Modells für den Blühbeginn der Sommerlinde in DOY an Einzelstationen (s. Abb. 10) und im Stationsmittel, 1951–2015

4.3 Phasenbezogene Klimaänderungen in Hessen

Alle für das Bienenflugmodell relevanten meteorologischen und phänologischen Größen wurden jeweils das ganze Jahr, sowie die Phasen der Haupt- und Obstblüte ausgewertet. Da zwischen den einzelnen Stationen in Hessen keine signifikanten Unterschiede vorlagen, wurde der Mittelwertvergleich mit den Datenpunkten aller Stationen gemeinsam durchgeführt. Verglichen wurden der historische Lauf (Z0: 1971–2000) und die ferne Zukunft (Z3: 2071–2100). Dies ergibt pro Klimamodell und Zeitscheibe eine Stichprobenzahl von $n = 1620$ (6 Stationen, 9 Gridzellen, 30 Jahre).

Tabelle 3 zeigt die Veränderungen der **mittleren Jahrestemperatur** über alle drei Globalmodelle. Hierbei zeigt das regionale Klimamodell (RCA4) einen signifikanten Anstieg der Jahresmitteltemperatur um 1.3 K für das RCP 2.6 und um 3.9 K für das RCP 8.5. Während der Hauptblüte ist eine signifikante Temperaturänderung um 0.3 K (RCP 2.6) beziehungsweise 1.0 K (RCP 8.5) zu erkennen. Während der Obstblüte sinkt die mittlere Temperatur um 0.1 K im RCP 2.6 und steigt um lediglich 0.2 K im RCP 8.5. Diese Veränderungen finden sich in ähnlicher Form auch in den einzelnen Modellen (siehe Anhang).

Tab. 3: Mittlere Lufttemperatur für das Jahr, sowie die Hauptblüte und Obstblüte, jeweils für die Szenarien RCP 2.6 und RCP 8.5 und die Zeiträume Z0 und Z3. Signifikanz der Temperaturänderung (Δ) für **p < 1%, ***p < 0.1%

	Jahresmitteltemperatur (°C)		Mittlere Temperatur Hauptblüte (°C)		Mittlere Temperatur Obstblüte (°C)	
	2.6	8.5	2.6	8.5	2.6	8.5
Z0: 1971–2000	8.3		10.5		10.6	
Z3: 2071–2100	9.6	12.2	10.8	11.5	10.5	10.8
Δ (Z3 – Z0)	1.3 K***	3.9 K***	0.3 K***	1.0 K**	-0.1 K***	0.2 K***

Bei der **Globalstrahlung** zeigen sich ebenfalls signifikante Trends. So gibt es eine Verringerung der Stunden mit einer Einstrahlung $> 200 \text{ Wm}^{-2}$ um 1/8 während der Hauptblüte und sogar um 27 % während der Obstblüte. Dies lässt sich vor allem auf die Verfrühung der phänologischen Stadien zum Jahresbeginn und zu kürzeren Tageslängen zurückführen (siehe Kapitel 4.4). Die im Jahresmittel zusätzliche Einstrahlung verschiebt sich in die trachtfreie Zeit im Spätsommer und Herbst. Für den Parameter **Windgeschwindigkeit** stimmen die Veränderungen dieser Größe grundsätzlich mit denen des ReKliEs-Ensembles überein (REKLIES): Eine Zunahme der Stunden mit einer Windgeschwindigkeit $> 3 \text{ ms}^{-1}$ über das ganze Jahr, die sich jedoch auf den Winter konzentriert, während die Zeit der Haupt- und Obstblüte (Frühling und Sommer) eine leichte Abnahme der windigen Stunden zeigt (-11 % in der Hauptblüte und

-14 % in der Obstblüte). Für den **Niederschlag** lässt sich aufgrund der geringen Ensemblegröße der verwendeten Modellläufe keine belastbare Aussage treffen.

4.4 Veränderungen in der Phänologie der Trachtpflanzen

Mit Hilfe der phänologischen Modelle konnten die Veränderungen in der Blühphänologie der Trachtpflanzen berechnet und untersucht werden. Für den potentiellen Bienenflug relevant ist hierbei neben dem Blühbeginn die Dauer der jeweiligen Trachtperiode.

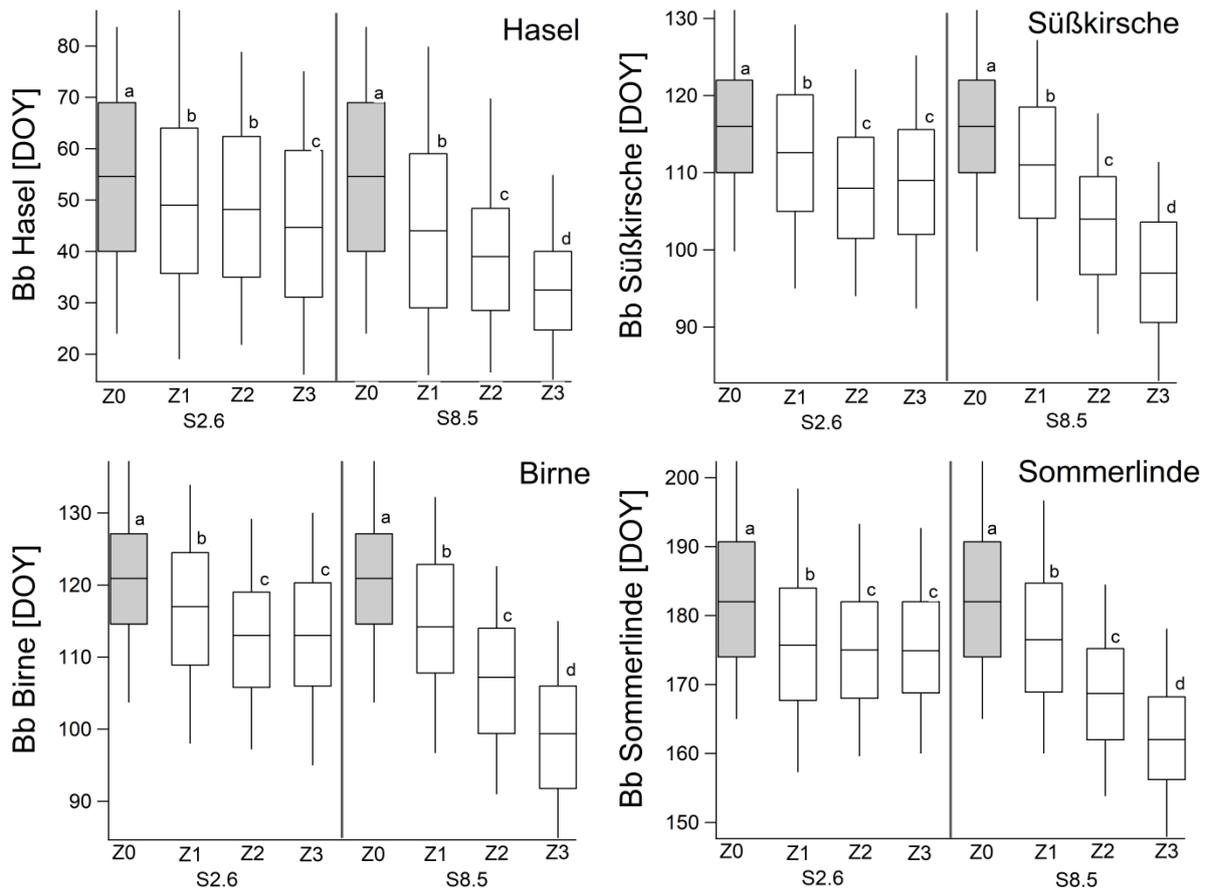


Abb. 16: Ergebnisse der Modellierung des Blühbeginns für Hasel, Süßkirsche, Birne und Sommerlinde, im Vergleich der Zeiträume Z0 (historischer Lauf, 1971–2000), Z1 (2011–2040), Z2 (2041–2070) und Z3 (2071–2100), Mittel über alle drei Globalmodelle. Die Box stellt jeweils unteres und oberes Quartil, sowie den Median dar. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in den Mittelwerten für $p < 0.1\%$.

Für alle vier betrachteten Trachtpflanzen ist eine Verfrühung des Blühbeginns sichtbar (Abb. 16)⁴. Im Vergleich zur historischen Periode (Z0, 1971–2000) zeigt die Hasel für die Jahre 2071–2100 (Z3) eine hochsignifikante mittlere Verfrühung von 9 (Szenario 2.6) bis 21 (Szenario 8.5)

⁴ Die Ergebnisse der einzelnen Globalmodelle finden sich im Anhang

Tagen, für die Süßkirsche sind es 7 (RCP 2.6) bis 19 (RCP 8.5) Tage (Abb. 16). Die beiden anderen betrachteten Pflanzenarten zeigten einen ähnlich verfrühten Blühbeginn (s. Anhang).

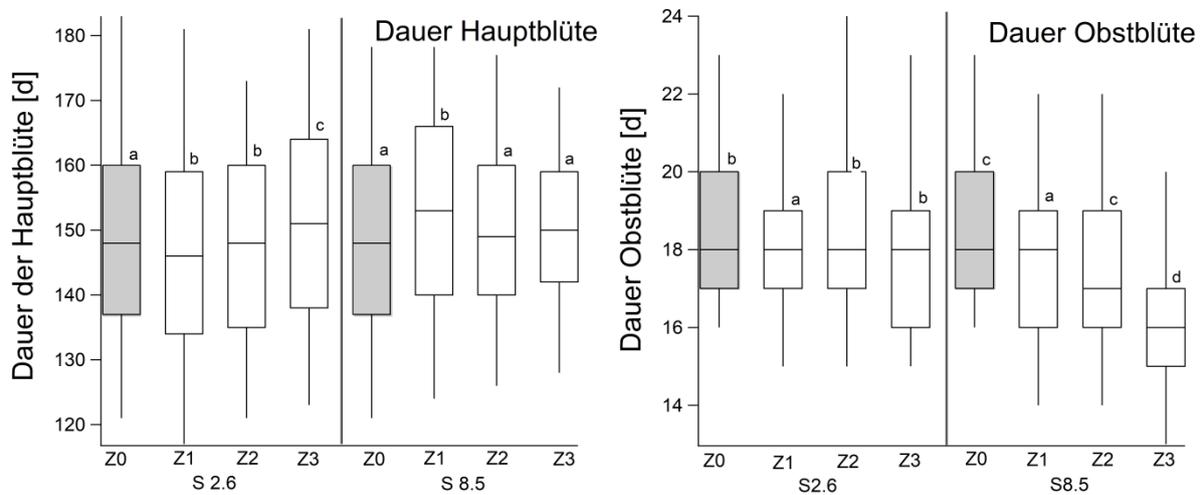


Abb. 17: Ergebnisse der Modellierung der Dauer der Hauptblüte (Blühbeginn Hasel bis Blühende Winterlinde, oben) und der Dauer der Obstblüte (Blühbeginn Süßkirsche bis Blühende Apfel, unten). Vergleich der Zeiträume Z0 (historischer Lauf, 1971–2000), Z1 (2011–2040), Z2 (2041–2070) und Z3 (2071–2100), Mittel über alle drei Globalmodelle. Die Box stellt jeweils unteres und oberes Quartil, sowie den Median dar. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in den Mittelwerten für $p < 0.1\%$.

Da sich Blühbeginn von Hasel und Winterlinde (Blühbeginn Sommerlinde + 21 d) gleichermaßen nach vorne verschieben, zeigt die Dauer der Hauptblüte keine eindeutigen Trends (Abb. 17). Dies ist bei der Obstblüte anders. Hier ist, insbesondere für das RCP 8.5, eine signifikante Verkürzung der Blühdauer um 2.7 Tage (Mittel über alle GCMs) zu erkennen (Abb. 17), da sich der Blühbeginn des Apfels stärker verfrüht als der Blühbeginn der Süßkirsche.

4.5 Mögliche Veränderungen des potentiellen Bienenflugs

Vergleicht man den potentiellen Bienenflug für die verschiedenen Stationen (hier dargestellt für RCP 4.5), so zeigen sich besonders für das ganze Jahr tendenziell regionale Unterschiede (Abb. 18a). Die Stationen Frankfurt und Mannheim zeigen starken Bienenflug, die vier anderen Stationen liegen auf einem niedrigeren Niveau eng beieinander. Da dies bei den beiden anderen Zeitspannen Blüte und Obstblüte nicht der Fall ist (Abb. 18b und 18c), ist anzunehmen, dass die Verlängerung der Vegetationsperiode und der Temperanstieg im Süden Hessens stärkere Auswirkungen auf den Bienenflug im Spätsommer und Herbst haben.

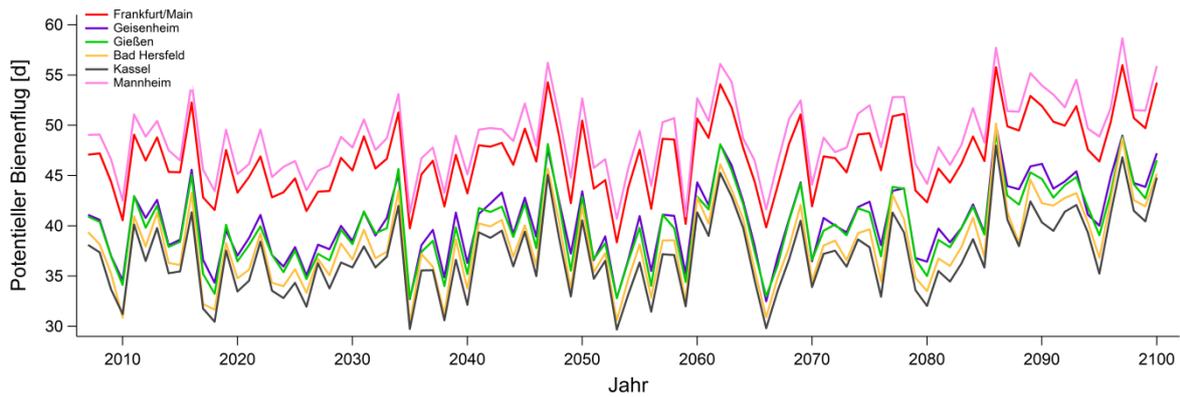


Abb. 18a: Potentieller Bienenflug im Jahr, alle Stationen, RCP 4.5, 2006–2100, hier für das GCM MPI-ESM

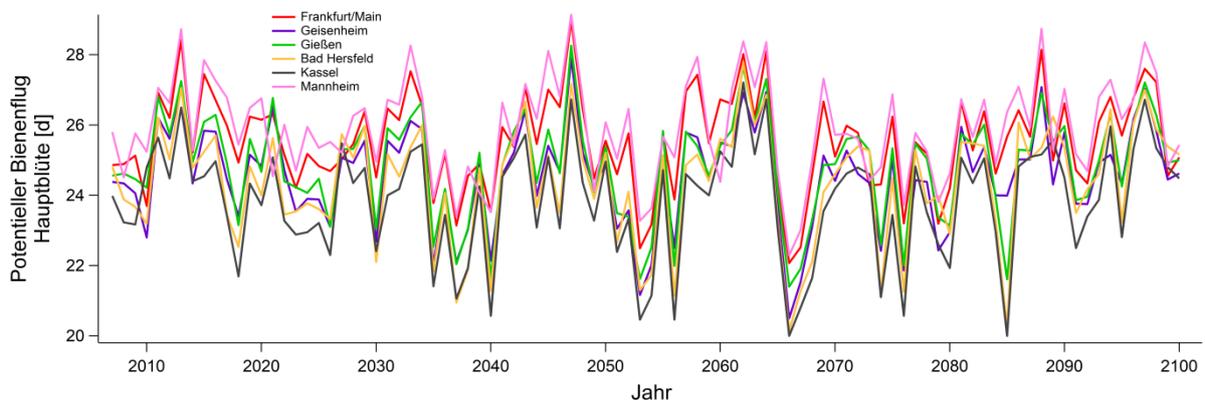


Abb. 18b: Potentieller Bienenflug zur Hauptblüte, alle Stationen, RCP 4.5, 2006–2100, hier für das GCM MPI-ESM

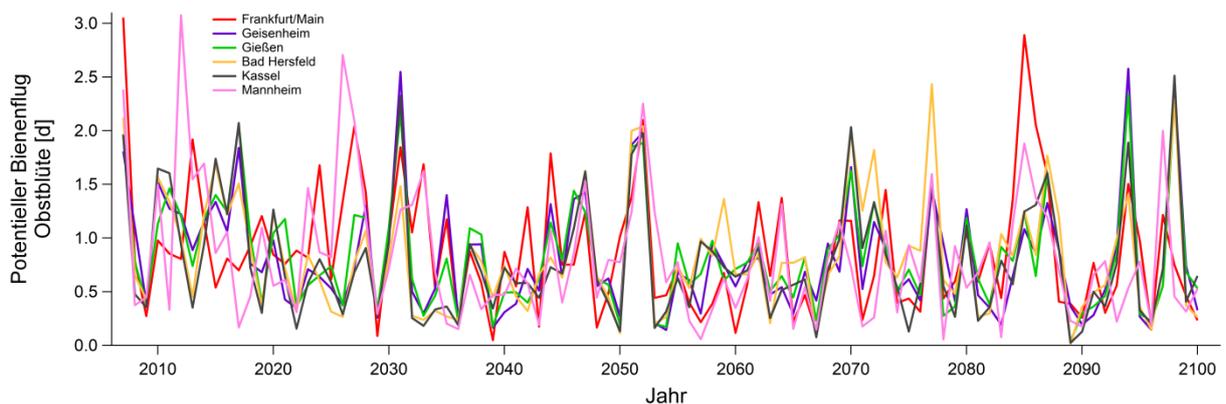


Abb. 18c: Potentieller Bienenflug zur Obstblüte, alle Stationen, RCP 4.5, 2006–2100, hier für das GCM MPI-ESM

Vergleicht man den über alle Stationen gemittelten potentiellen Bienenflug, sowohl für die Globalmodelle einzeln als auch im Mittel über die drei Modelle, so zeigen sich sowohl eine große Variabilität zwischen den Jahren als auch deutliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Szenarien (Abb. 19–21). Um die Veränderungen im potentiellen Bienenflug auf Signifikanz zu prüfen, wurde ein Mittelwertvergleich zwischen historischem Lauf (Z0, 1971–2000), naher Zukunft (Z1, 2011–2040), mittlerer Zukunft (Z2, 2041–2070) und ferner Zukunft (Z3, 1971–2100)

durchgeführt. Diese Tests wurden sowohl für die einzelnen Modelle als auch gemittelt über die drei Globalmodelle durchgeführt.

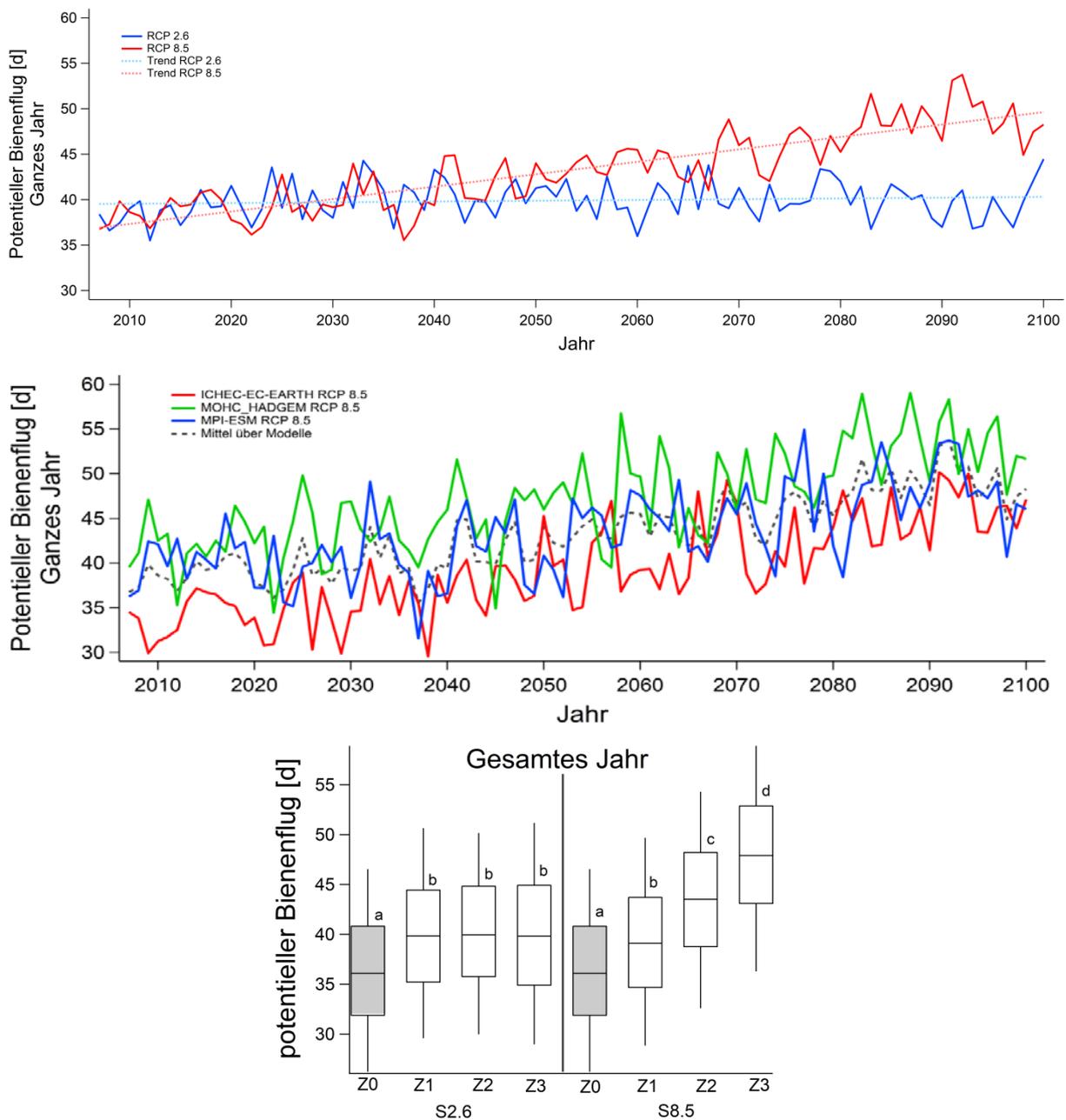


Abb. 19: Mittlerer potentieller Bienenflug im **Jahr**, 2006–2100 (oben), Mittel aus 6 Stationen und 3 Globalmodellen, für RCP 2.6 (blau) und RCP 8.5 (rot), lineare Trends sind als gestrichelte Linien dargestellt (RCP 2.6 blau, RCP 8.5 rot). Mittlerer potentieller Bienenflug 2006–2100, Vergleich der 3 Globalmodelle RCP 8.5 (Mitte), Mittel aus 6 Stationen, ICHEC-EC-EARTH (rot), MOHC-HadGEM (grün) und MPI-ESM (blau). Der Mittelwert ist als gestrichelte Linie dargestellt. Mittlerer potentieller Bienenflug (unten), Mittel aus 6 Stationen und 3 Globalmodellen. Vergleich der Zeiträume Z0 (historischer Lauf, 1971–2000), Z1 (2011–2040), Z2 (2041–2070) und Z3 (2071–2100). Die Box stellt jeweils unteres und oberes Quartil, sowie den Median dar. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in den Mittelwerten für $p < 0.1\%$.

Abbildung 19 zeigt die Mittelwerte des potentiellen Bienenflugs für zwei Szenarien im gesamten Jahr, gemittelt über alle drei Globalmodelle (oben), sowie für die drei Modelle einzeln (Mitte). Hierbei zeigt sich ein signifikanter Anstieg des potentiellen Bienenfluges, insbesondere für Szenario 8.5, sowohl für jedes Modell einzeln als auch im Modellmittel. Dies ist vor allem durch höhere Temperaturen im Jahresverlauf bedingt. Deutlich wird dies im Modellvergleich: Das Modell mit den höchsten Temperaturen (MOHC-HadGEM) zeigt die höchsten Werte beim potentiellen Bienenflug, während das Modell mit den niedrigsten Temperaturen (ICHEC-EC-EARTH) den niedrigsten potentiellen Bienenflug prognostiziert.

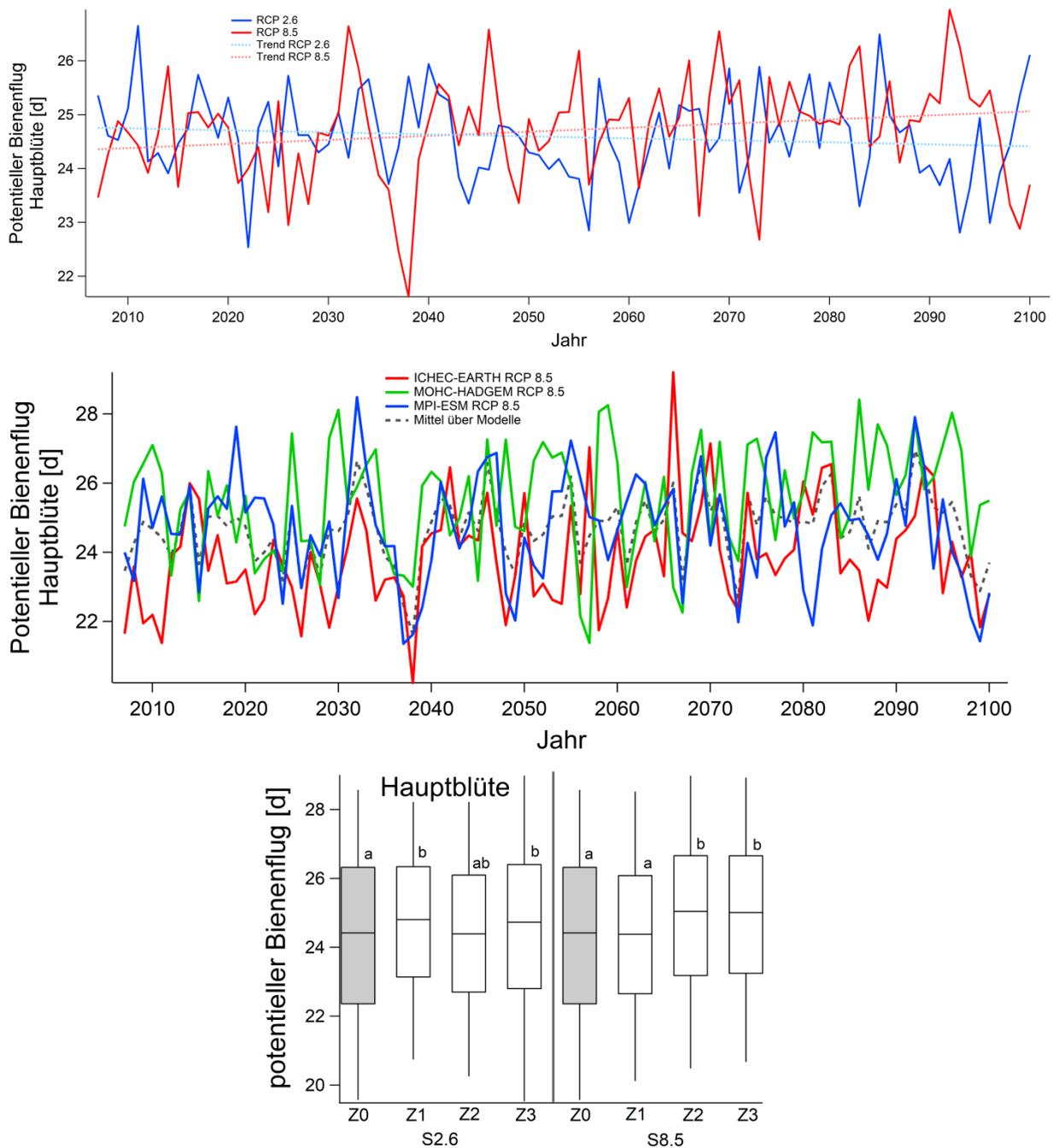


Abb. 20: Mittlerer potentieller Bienenflug zur **Hauptblüte** 2006–2100. Alle weiteren Angaben sind identisch mit Abbildung 19.

Wie im Vergleich mit den Berechnungen für die Hauptblüte deutlich wird (Abb. 20), ist die Zunahme des potentiellen Bienenflugs allerdings hauptsächlich im Spätsommer und Herbst zu finden, also in der Zeit nach der Hauptblüte. Während der Hauptblüte ist dieser positive Trend nicht zu erkennen. Die Verfrühung der Blühperiode (siehe Kapitel 4.4) und die daraus resultierenden kürzeren Tage am Anfang der Hauptblüte können durch die steigenden Temperaturen ausgeglichen werden. Da sich die Temperaturen während der Hauptblüte zwischen den Modellen nicht signifikant unterscheiden, gibt es hier keine signifikanten Unterschiede zwischen den Modellen.

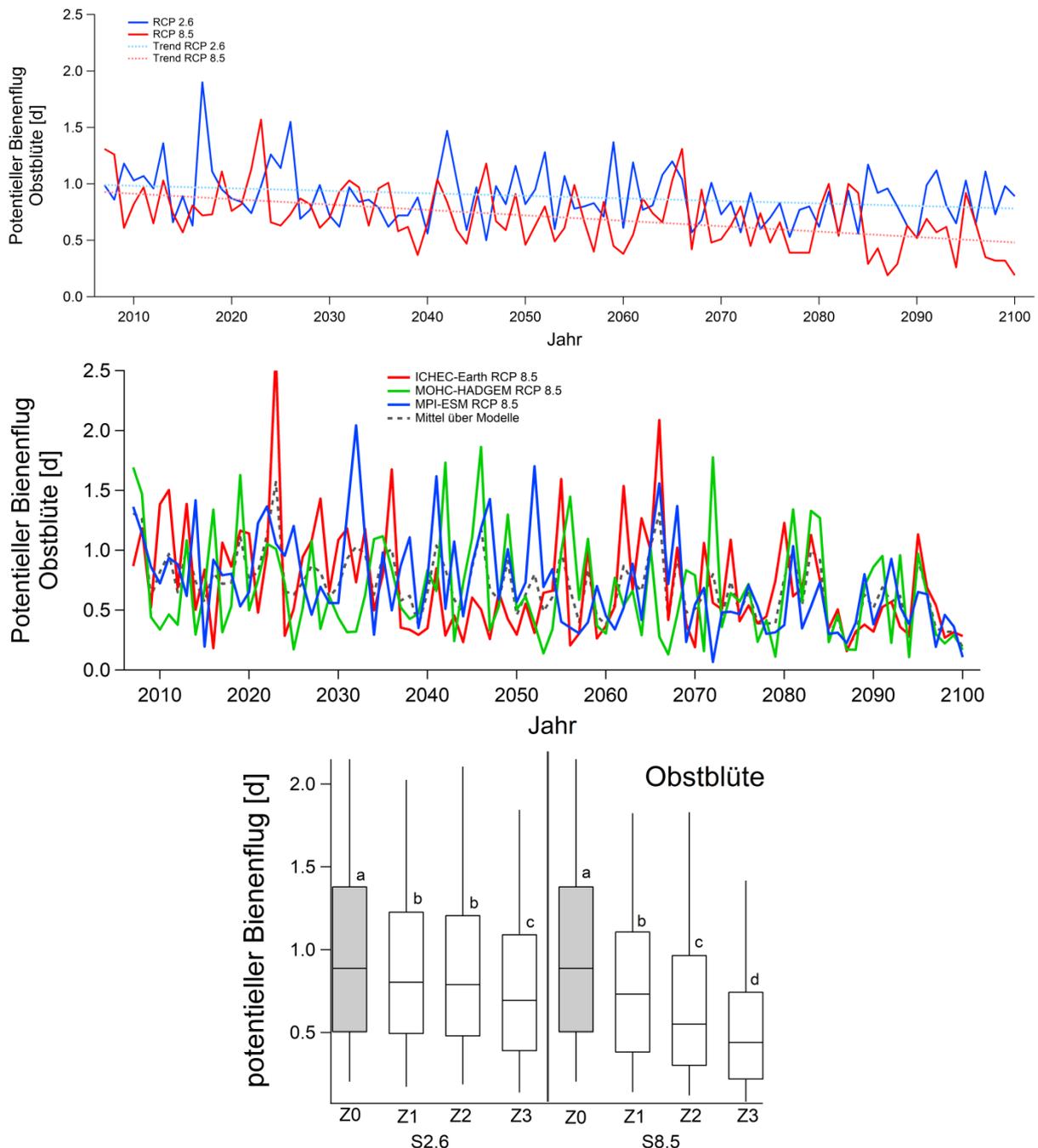


Abb. 21: Mittlerer potentieller Bienenflug zur **Obstblüte** 2006–2100. Alle weiteren Angaben sind identisch mit Abbildung 19.

Dies gilt ebenfalls für die Lufttemperatur und den potentiellen Bienenflug während der Obstblüte (Abb. 21). Hier wird der Einfluss der Phänologie noch deutlicher. Es zeigt sich für alle Szenarien ein signifikanter negativer Trend. Im Szenario 8.5 führt dies zur Halbierung des potentiellen Bienenfluges im Vergleich zwischen dem historischen Lauf (Z0) und der fernen Zukunft (Z3). Dies ist bedingt durch die Verschiebung der Obstblüte in einen Zeitraum, in dem durch kürzere Tage weniger Bienenflug möglich ist und durch eine deutliche Verkürzung der Obstblüte (siehe Kapitel 4.4). Dieser Effekt könnte sich sogar noch verstärken, da das Modell eine mögliche Verkürzung der Blühdauer, wie sie etwa BLANKE & KUNZ (2008) in ihren Versuchen finden, nicht berücksichtigt. Da sich die Temperatur während der Obstblüte nicht ändert, kann die Verkürzung der Tageslänge hier nicht, wie in der Hauptblüte, durch steigende Temperaturen ausgeglichen werden.

Fazit:

Selbst wenn die drei untersuchten Globalmodelle kein vollständiges Ensemble darstellen zeigt sich, dass eine Desynchronisierung zwischen potentielltem Bienenflug und Blüte nicht stattfindet, obwohl der Bienenflug während der Blütezeit durch kürzere Tageslängen begrenzt wird. Das verfrühte Auftreten der Blühzeiträume kann nicht durch günstigere Witterungsbedingungen (höhere Temperaturen, weniger Niederschlag, geringere Windgeschwindigkeiten) ausgeglichen werden. Im Obstbau kann dieser Bestäubungsverlust gerade bei frühblühenden Arten durch den (zusätzlichen) Einsatz von Wildbienenarten ausgeglichen werden, da diese unter schlechteren Witterungsbedingungen ebenfalls flugfähig sind.

Zudem führt der Klimawandel zu einer verlängerten trachtarmen, aber warmen Zeit im Sommer und Herbst, die durch die Fütterung der Bienen ausgeglichen werden muss. Für Imker/innen wird es daher immer wichtiger, die Zeit nach Ende der Winterlindenblüte standortangepasst und individuell zu bewerten und die Fütterung anzupassen.

5. Honigertrag

Honig ist nicht nur eine messbare Kenngröße der Bestäubungsleistung von Honigbienen, er ist zudem ein Wirtschaftsfaktor. Die Nachfrage nach Honig ist in Deutschland etwa fünfmal so groß wie das Angebot, d.h. es werden also 80 % des hier konsumierten Honigs importiert, meist vom südamerikanischen Kontinent (INSTITUT FÜR BIENENKUNDE, FRANKFURT). Hessische Imkerinnen und Imker produzieren pro Jahr etwa 1.500 Tonnen Honig (INSTITUT FÜR BIENENKUNDE, FRANKFURT). Die Auswirkungen, die klimatische Veränderungen auf den Honigertrag haben, sind zentral für die wirtschaftliche Lebensgrundlage der Imkerinnen und Imker.

Der Honigertrag hängt von verschiedenen Faktoren ab, die nicht immer klar zu trennen sind. Interne Faktoren, wie Größe und Gesundheit des Volkes, aber auch die genetischen Anlagen spielen zusammen mit externen Faktoren, wie der Trachtverfügbarkeit und witterungsbedingten Flugbedingungen, eine wichtige Rolle. Die Trachtpflanzen selber wiederum reagieren ebenfalls auf Temperatur, Strahlung und Wasserverfügbarkeit mit unterschiedlicher Nektar- und Pollenproduktion. Um einen dieser Einflüsse zu quantifizieren, müssen die anderen so gut wie möglich herausgerechnet werden.

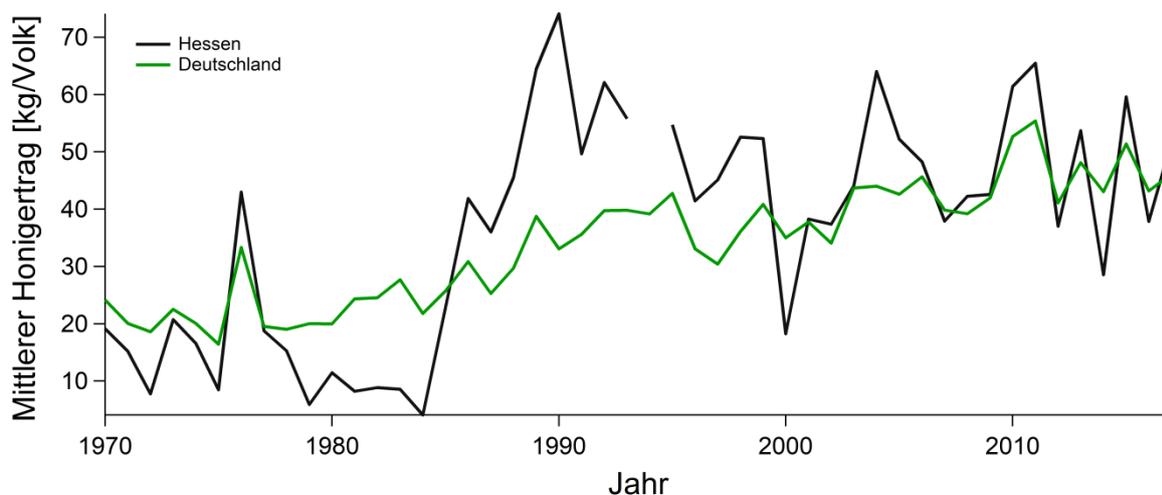


Abb. 22: Mittlerer Honigertrag aller Zuchtvölker in Hessen (Anzahl der Völker: 7 bis 412) und in Deutschland (Anzahl der Völker: 565 bis 5330) von 1970–2017

Betrachtet man den mittleren Honigertrag aller Zuchtstationen in Deutschland und Hessen (Abb. 22), so zeigt sich dieses Zusammenspiel der Faktoren deutlich. Einzelne herausstechende Ereignisse lassen sich durch die Witterung erklären, etwa der überdurchschnittlich hohe Honigertrag im Jahr 1976. Hier folgte auf einen kalten Winter ein schlagartiger Umschwung auf warmes, trockenes und frostfreies Wetter bis in den Juli, dass sowohl für die Blüte der Trachtpflanzen sehr gute Bedingungen bot (kein Frost, kein Verregnen der Blüte), als auch perfektes Flugwetter für die Bienen über die gesamte Trachtzeit. In den Jahren 2004 und 2011 finden sich

ebenfalls (in geringerem Maße) warme, frostfreie und trockene Frühlings- und Frühsommerperioden in Hessen. Darüber hinaus zeigt sich ein signifikanter Anstieg des Honigertrags von 1980 bis 2017. Deutschlandweit ist dieser Anstieg stetig, während in Hessen ein deutlicher Sprung zwischen 1980 und 1990 sichtbar ist.

Dieser Anstieg im Honigertrag kann nicht durch den potentiellen Bienenflug erklärt werden, da die Berechnungen keine Steigerung des potentiellen Bienenflugs während der Hauptblüte zeigen (siehe Kapitel 3.2). Abbildung 23 zeigt die Anbaufläche von Raps in Hessen von 1970 bis 2017. Raps ist eine der wichtigsten und ertragsreichsten Trachten in Deutschland. Ende der 1960er-Jahre begann die Anbaufläche in Deutschland stetig zu steigen, wobei es in Hessen zwischen 1980 und 1990 zu einem sprunghaften Anstieg kam. Die gestiegene Verfügbarkeit von dieser ergiebigen und leicht verfügbaren Tracht erklärt den langfristig unterliegenden Trend im Honigertrag. Da das Bienenflugmodell von einer konstanten Trachtverfügbarkeit ausgeht, kann es diesen Faktor nicht widerspiegeln.

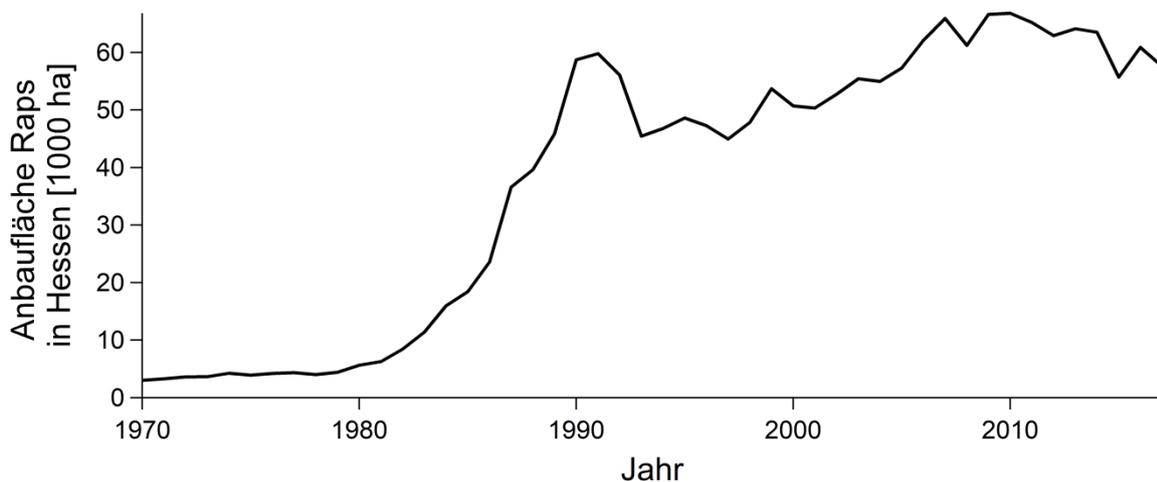


Abb. 23: Anbaufläche für Raps in Hessen für die Jahre 1970–2017. Quelle: Hessisches Statistisches Landesamt, Bundesamt für Statistik

Um diese im Honigertrag gefundenen Trends, bedingt durch genetischen Fortschritt und gesteigertem Trachtangebot aus dem Honigertrag herauszurechnen, wurde für den mittleren Honigertrag in Hessen, neben den Originaldaten zur Berechnung eines statistischen Zusammenhangs zwischen Honigertrag und potentielltem Bienenflug, zudem die Abweichungen vom 5-jährig gleitenden Mittel berechnet. Aufgrund der großen Streuung der Daten konnten jedoch nur Korrelationskoeffizienten zwischen $r=0.30$ und $r=0.40$ ermittelt werden. Dieses Resultat zeigt, dass die langfristigen Trends im Honigertrag witterungsunabhängig sind und von anderen Faktoren gesteuert werden, die das Bienenflugmodell nicht abbildet und durch den gleitenden Mittelwert nur unzureichend erklärt werden konnten.

Um zu überprüfen, ob eine räumlich differenzierte Betrachtung der einzelnen Zuchtstellen die Korrelation zwischen potentielltem Bienenflug und Honigertrag verbessert, wurden Daten aus der Datenbank „beebreed.org“ des Länderinstituts für Bienenkunde in Hohen Neuendorf verwendet. Hier werden von Züchterinnen und Züchtern im Rahmen der Zuchtwertschätzung die Honigleistungen ihrer Völker gemeldet. Von den in der Datenbank verzeichneten 42 ehemaligen und noch aktiven Züchterinnen und Züchtern in Hessen konnten 29 Adressen ermittelt werden. Da die Nutzung der Ertragsdaten nur mit Einwilligung der Züchterinnen und Züchter erfolgen kann, wurden diese angeschrieben und um ihre Einwilligung gebeten. Der Rücklauf belief sich auf 11 Antworten, von denen 8 positiv waren. Eine Zuchtstelle konnte nicht berücksichtigt werden, da dieser Imker mit seinen Völkern wandert. Die freigegebene Datenmenge beläuft sich somit auf knapp über 4000 Werte, verteilt auf einen Zeitraum von 1971 bis 2017. Hiervon stammen allerdings 70 % der Daten von einem Züchter, ein zweiter liefert weitere 10 %. Räumlich liegen alle Standorte in Nord- und Osthessen (Naturräume Westhessisches Berg- und Senkenland, Osthessisches Bergland), für das südliche Hessen wurden keine Genehmigungen zur Datennutzung erteilt. Eine Übersicht findet sich in Tabelle 4. Aus Datenschutzgründen wurde jeder Zuchtstelle in diesem Bericht ein Code zugeordnet.

Tab: 4: Übersicht über die verwendeten Datensätze zum Honigertrag, ZST: Zuchtstelle

Code Zuchtstelle	Anzahl der Jahre	Zeitspanne	Anzahl der Völker	Naturraum
ZST1	42	1970–2015	2–21	Westhessisches Berg- und Senkenland
ZST2	15	2003–2017	9–26	Westhessisches Berg- und Senkenland
ZST3	12	2006–2017	11–25	Osthessisches Bergland
ZST4	5	2013–2017	6–12	Osthessisches Bergland
ZST5	6	2012–2017	7–12	Westhessisches Berg- und Senkenland
ZST6	4	2014–2017	6–15	Westhessisches Berg- und Senkenland
ZST7	39	1971–2017	10–126	Westhessisches Berg- und Senkenland

Aus Abb. 24 wird ersichtlich, dass Zuchtstation 1 (ZST1) über die längste Zeitreihe verfügt, während für ZST7 die meisten Völker in die Stichprobe eingehen. Der mittlere Honigertrag hängt nicht mit der Anzahl der Völker pro Stichprobe zusammen.

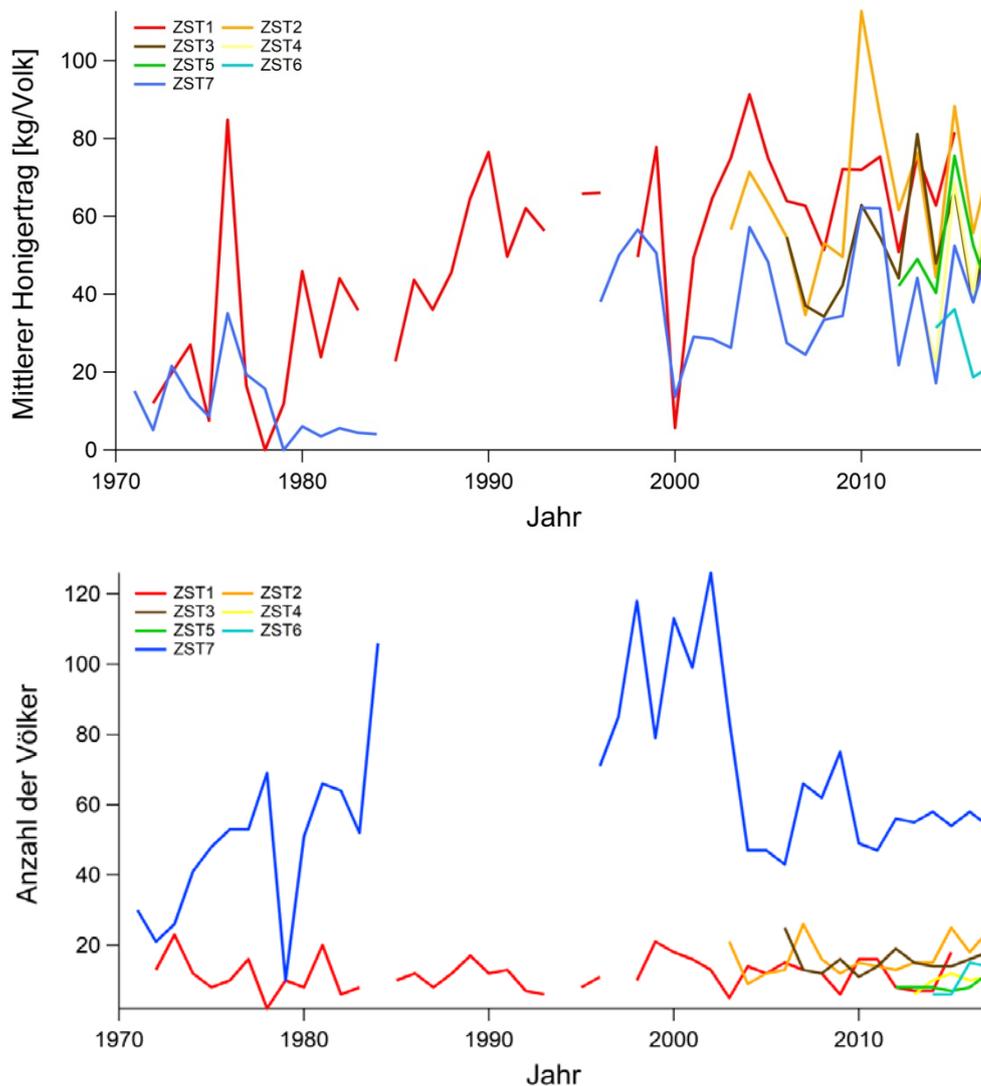


Abb. 24: Mittlerer Honigertrag pro Volk in Kilogramm (oben) und Anzahl der Völker in der Stichprobe (unten) nach Zuchtstellen (ZST).

Abbildung 24 verdeutlicht das Problem bei der Auswertung der Honigertragsdaten. Da nur eine Station über eine längere Zeitreihe verfügt, ist die Aussagekraft hier aufgrund des Stichprobenumfangs gering. Aus diesem Grund kann der Fokus bei der Quantifizierung des Zusammenhangs zwischen potentielltem Bienenflug und Honigertrag nur auf dem Zeitraum 2006–2017 liegen, für den Daten von mindestens drei Zuchtstellen zur Verfügung stehen.

Hierzu wurde jeder Zuchtstelle die nächstgelegene DWD-Wetterstation zugeordnet, für die alle nötigen Daten zur Berechnung des potentiellen Bienenflugs im angegebenen Zeitraum vorhanden waren. Für den Zeitraum von 2006–2017 lagen für jedes Jahr mindestens die Daten von drei Zuchtstellen vor (Abb. 25). Diese zeigen deutliche jährliche Unterschiede in den Jahren 2006–2011 und einen eher gleichgerichteten Verlauf ab dem Jahr 2011.

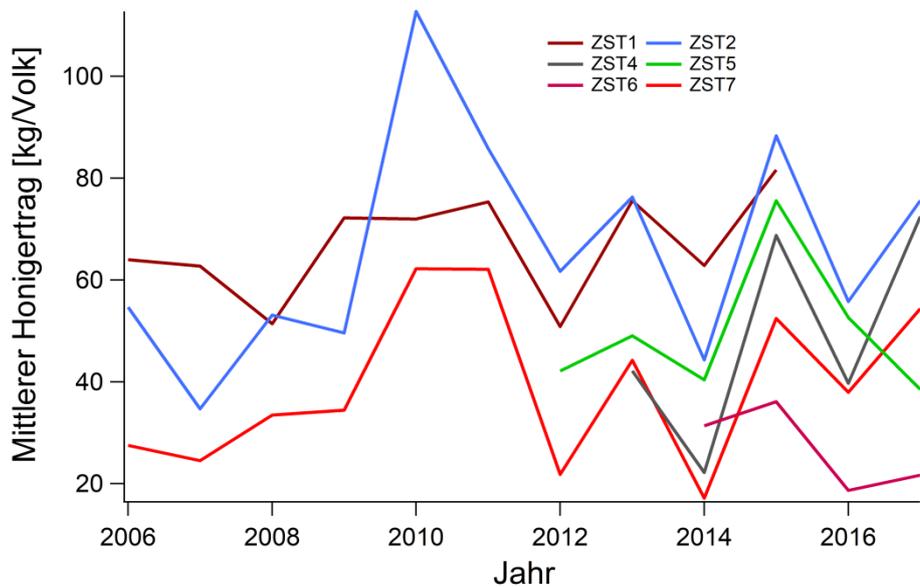


Abb. 25: Mittlerer Honigertrag in kg/Volk an sieben Zuchtstellen (2006–2017)

Diese Differenzen im Honigertrag zwischen den Zuchtstellen können sowohl von der Witterung verursacht sein, als auch vom Trachtangebot vor Ort, der Gesundheit und genetischen Veranlagung der Völker sowie von Maßnahmen der Imker/innen abhängen. Die Stationen ZST1 und ZST2 weisen hierbei die höchsten Erträge auf, während ZST4, ZST6 und ZST7 die niedrigsten Erträge zeigen. Rein geographische Gründe liegen hierfür nicht vor, da die räumlich am nächsten liegen Zuchtstellen (ZST1, ZST7) weniger als 30 km voneinander entfernt sind.

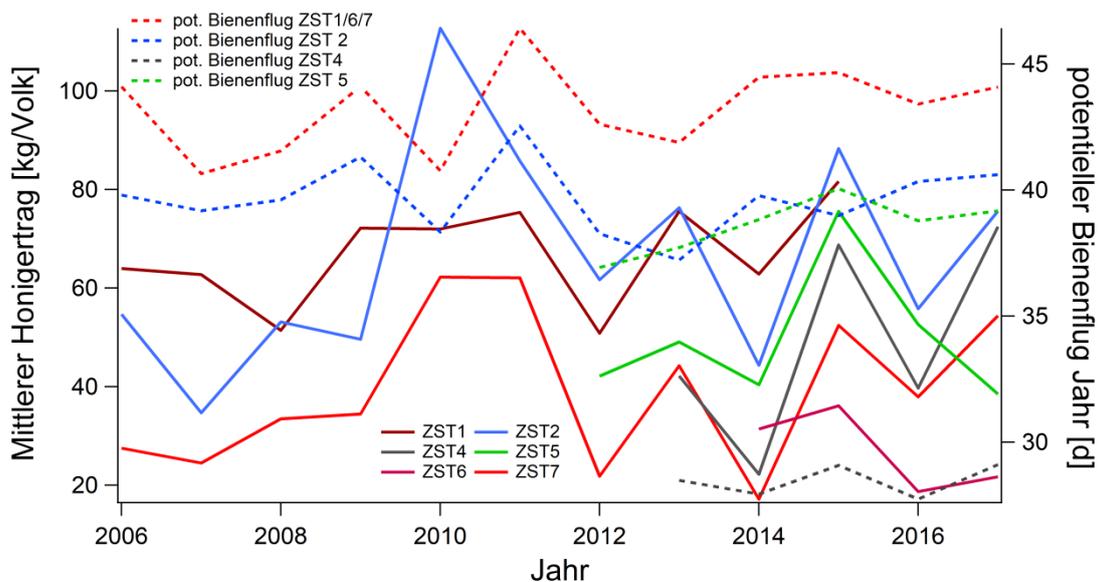


Abb. 26: Mittlerer Honigertrag in kg/Volk an sieben Zuchtstellen und dazugehöriger potentieller Bienenflug im Jahr (2006–2017).

Im nächsten Schritt wurden die Honigerträge mit dem aus Stationsdaten errechneten potentiellen Bienenflug in Beziehung gesetzt. Hierbei liegen die Zuchtstellen 1, 6 und 7 in der Nähe der gleichen DWD-Station, für die Zuchtstellen 2, 4 und 5 wurden die Wetterdaten jeweils einer anderen Station verwendet. Da die jährlichen Witterungsbedingungen innerhalb Hessens nur in begrenztem Umfang differieren, hat der potentielle Bienenflug im Jahr an den vier berechneten Stationen einen zumeist gleichgerichteten Verlauf (Abb. 26). Leicht signifikante Korrelationen zwischen Honigertrag und potentielltem Bienenflug finden sich nur bei den beiden kürzesten Zeitreihen, wobei ihre Aussagekraft aufgrund der geringen Stichprobengröße begrenzt ist.

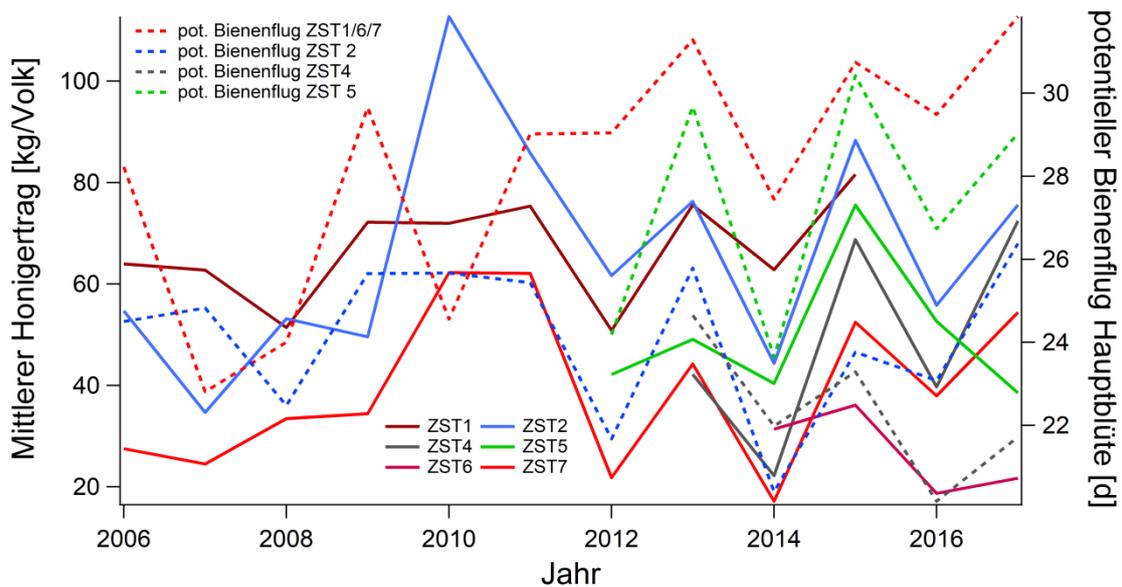


Abb. 27: Mittlerer Honigertrag in kg/Volk an sieben Zuchtstellen und dazugehöriger potentieller Bienenflug in der **Hauptblüte** (2006–2017).

Der potentielle Bienenflug zur Hauptblüte zeigt ab 2012 sehr deutlich einen gleichgerichteten Verlauf, in den Jahren davor allerdings nicht (Abb. 27). Ab diesem Jahr ist ein Zusammenhang zwischen dem Verlauf von Honigertrag und potentielltem Bienenflug sichtbar. Es ist jedoch deutlich, dass weitere Faktoren eine Rolle beim Honigertrag spielen. So zeigt sich zwar ein gleichgerichteter Verlauf der Zuchtstellen 1, 6 und 7, die alle drei mit der gleichen Wetterstation in Verbindung gesetzt wurden, die absoluten Honigerträge sind jedoch deutlich unterschiedlich: Zuchtstelle 1 hat recht hohe Honigerträge, die Zuchtstellen 6 und 7 eher niedrige. Hier kommen Faktoren wie Honigleistung der Bienen und Trachtverfügbarkeit ins Spiel. Damit sind die berechneten Korrelationskoeffizienten für diesen Zeitraum wenig aussagekräftig.

Zwischen Honigertrag und potentielltem Bienenflug zur Obstblüte gibt es wie erwartet keine signifikanten Korrelationen, da die Obstblüte im Vergleich zu den späteren Trachten nur einen geringen Anteil ausmacht.

Diese Untersuchungen haben gezeigt, dass der potentielle Bienenflug, also die Eignung eines Zeitraumes für den Bienenflug, alleine nicht ausreicht, um eine Abschätzung des Honigertrages

durchzuführen. Insbesondere die Trachtverfügbarkeit spielt eine nicht zu unterschätzende Rolle und ist selber von vielen Faktoren abhängig. Kurze Witterungsereignisse, die von Klimamodellen oft nur schwer abgebildet werden, können zum richtigen Zeitpunkt verheerenden Einfluss auf das Trachtangebot haben. Beispiele hierfür sind Frostereignisse zur Blütezeit (wie im Jahr 2017) oder Sturm- und Starkregenereignisse während der Blüte (häufig während der Sommertracht, Robinie/Linde). Diese Ereignisse sind schwer vorherzusagen und mit der Blühphänologie in Verbindung zu bringen.

Menschliche Faktoren spielen ebenfalls eine große Rolle, wie beispielsweise der Anstieg des Rapsanbaus in Hessen. Imker/innen haben hier durch die Wahl des Standortes einen großen Einfluss auf den Honigertrag. Entscheidungen in der Landschaft und Landwirtschaft sind zudem nicht zu unterschätzen. Die Trachtverteilung kann hierbei sehr kleinräumig sein und trotzdem große Wirkung zeigen. So erzeugten Imker des Imkervereins Bensheim/Bergstraße im Jahr des Hessentags 2014 etwa dreifach höhere Erträge, weil ein Teil der sonst anderweitig landwirtschaftlich genutzten Flächen als Kfz-Großparkplätze genutzt und zu diesem Zweck mit Klee eingesät wurden⁵. Diese Beobachtung zeigt deutlich, dass lokale Maßnahmen möglich sind, um den Honigertrag zu steigern. Der wichtigste Ansatzpunkt bleibt die Verfügbarmachung und der Schutz von Trachtpflanzen, sowohl auf privatem und öffentlichem Land (Gärten, Parks), als auch in der Landwirtschaft. Hier haben sich bienentaugliche Zwischen- und Untersaaten bewährt, da sie mehrere Funktionen erfüllen können (Bodenfruchtbarkeit, Erosionsschutz, Futtermittel, MÜLLER ET AL., 2014). Als alleiniges Mittel sind sie allerdings nicht ausreichend. Der Schutz von Blühstreifen und der Erhalt von Hecken ist unabdingbar, da nur ein diverses Trachtangebot resilient gegenüber Schädlingen und extremen Wetterereignissen ist und gerade für Wildbienen nicht nur Nahrung, sondern auch Lebensraum bedeutet.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Der vorliegende Bericht befasst sich mit der Frage, wie sich potentielle Klimaänderungen auf den Bienenflug und Honigertrag auswirken könnten. Das hierzu verwendete Bienenflugmodell konnte durch die Kopplung mit den phänologischen Stadien der frühesten und spätesten Tracht-pflanze (Hasel und Winterlinde) deutlich verbessert werden und zeigt sehr gute Ergebnisse im Vergleich zu experimentell ermittelten Daten zum Bienenflug.

In der Untersuchung des potentiellen Bienenflugs an sechs Stationen in Hessen und Baden-Württemberg für die Jahre 1951–2015 zeigte sich ein Anstieg des potentiellen Bienenfluges im Jahr, bedingt durch wärmere Lufttemperaturen und damit einhergehend besseren Flugbedingungen. Dieser Trend ist ebenfalls für veränderte klimatische Verhältnisse auf der Basis von

⁵ Mündliche Mitteilung P. Dengler, Imkerverein Bensheim, 20.12.2018

drei globalen Klimamodellrechnungen sichtbar. Für das Emissionsszenario RCP 8.5 („weiterwie-bisher“-Szenario) konnte für die Periode 2071–2100 eine Steigerung des potentiellen Bienenflugs im Vergleich zum Zeitraum 1971–2000 um 25 % berechnet werden, für das Klimaschutzszenario (RCP 2.6) sind es noch 10 %. Diese Steigerung findet jedoch nicht zur Hauptblütezeit statt. Die steigenden Temperaturen bewirken eine Verfrühung der Blüte aller untersuchten Trachtpflanzen (Hasel, Birne, Süßkirsche, Sommerlinde) um im Mittel 7 (RCP 2.6) bis 21 (RCP 8.5) Tage. Betrachtet man den potentiellen Bienenflug zur Hauptblüte (Hasel bis Winterlinde), so sind keine signifikanten Änderungen sichtbar. Während der Obstblüte (Süßkirsche bis Apfel) ergibt sich sogar eine signifikante Verringerung des potentiellen Bienenflugs um 19 % (RCP 2.6) beziehungsweise 44 % (RCP 8.5). Der verfrühte Blühbeginn bedeutet keine direkte Desynchronisation zwischen Bienenflug und Blütezeit, bewirkt aber eine Verringerung der für Bienen nutzbaren Tageslichtstunden. Diese Reduktion der Flugstunden kann während der Hauptblüte durch steigende Temperaturen ausgeglichen, aber nicht übertroffen werden. Während der Obstblüte wird dieser Ausgleich nicht erreicht. Die Steigerung im potentiellen Bienenflug findet in der zunehmend wärmeren und bienenfluggeeigneten Zeitspanne im Spätsommer und Herbst statt, in der jedoch keine großen Trachten mehr vorhanden sind.

An dieser Stelle können Maßnahmen greifen, die nicht nur für Honigbienen, sondern auch für Wildbienen und den Honigertrag der Imker/innen essentiell sind. Da der limitierende Faktor für den Bienenflug und Honigertrag die Trachtverfügbarkeit ist, sind als wichtigste Handlungsanweisung für das Wohlergehen sowohl der Honig-, als auch der Wildbienen schon bekannte Maßnahmen zu nennen: Der Erhalt von Lebensräumen mit Trachtpflanzen unterschiedlicher Blühzeiten, auch im landwirtschaftlichen Bereich, mit einer Abdeckung des Blühzeitraums im Spätsommer und Herbst. Dies ist insbesondere für Wildbienen unabdingbar, da für sie die positiven menschlichen Maßnahmen nicht bestehen (Schutz vor Parasitenbefall, Zufütterung in trachtarmen Zeiten, Wasserversorgung).

Honigbienen bereiten die höheren Temperaturen an sich keine Probleme, denn es gibt eine große Temperaturspanne, in der Bienenflug möglich ist. Erst ab 38 °C ist der Bienenflug deutlich eingeschränkt. Steigende Temperaturen sorgen dafür, dass Bienen früher und länger fliegen und sammeln können. Sie bedürfen trotzdem weiterhin der Pflege durch die Imker/innen, die sich auf neue Herausforderungen, auch den Klimawandel betreffend, einstellen müssen. Hierzu gehört eine intensivere Varroabehandlung, da warme Winter die Ausbreitung der Varroamilbe begünstigen. Während Trockenphasen muss die Wasserversorgung der Bienen gewährleistet sein. Außerdem muss die Trachtverfügbarkeit im Spätsommer und Herbst gegeben sein, sonst besteht unter Umständen die Notwendigkeit einer stärkeren Fütterung, wenn die Bienen durch warme Winter nicht oder erst sehr spät in die Wintertraube gehen.

Die Bestäubung von Obstbäumen wird wahrscheinlich noch stärker als jetzt schon durch Hummeln erfolgen, da diese weniger Licht und Wärme zum Fliegen benötigen.

Zusammengefasst kann gesagt werden, dass der Klimawandel, infolge steigender Lufttemperaturen, zu guten Flugbedingungen für Honigbienen führt. Limitierend sind andere Faktoren: Gibt es ein ausreichend großes und diverses Trachtangebot und kann der Parasitenbefall durch Eingriffe der Imker/innen eingedämmt werden, so können Honigbienen (und damit Imker/Innen) in den nächsten 100 Jahren von den veränderten Klimabedingungen möglicherweise sogar profitieren.

7. Literatur

BIENENINSTITUT KIRCHHAIN (2003). Trachtpflanzen, Arbeitsblatt 205: <http://www.bieneninstitut-kirchhain.de>

BLANKE M, KUNZ A (2008): Einfluss rezenter Klimaveränderungen auf die Phänologie bei Kernobst am Standort Klein-Altendorf – anhand 50-jähriger Aufzeichnungen. *Erwerbs-Obstbau* 51(3), 101-114.

BLÜMEL K, CHMIELEWSKI FM (2012): Shortcomings of classical phenological forcing models and a way to overcome them. *Agricultural Forest Meteorology* 164, 10-19.

BLÜMEL K, CHMIELEWSKI FM (2013). Klimawandel in Hessen – Chancen, Risiken und Kosten für den Obst- und Weinbau. Abschlussbericht, Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG), 180 S.

CHMIELEWSKI FM, GÖTZ KP (2016): Performance of models for the beginning of sweet cherry blossom under current and changed climate conditions. *Agricultural and Forest Meteorology* 218–219, 85-91.

EURO-CORDEX – COORDINATED REGIONAL DOWNSCALING EXPERIMENT: <http://www.eurocordex.net/>

FRIESLAND H (1998) BIENE. Deutscher Wetterdienst, Agrarmeteorologische Forschung, Bundesallee 50, 38116 Braunschweig (persönlicher Austausch). In: Blümel K, Chmielewski FM (2013) Klimawandel in Hessen – Chancen, Risiken und Kosten für den Obst- und Weinbau. Abschlussbericht, Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG), 180 S.

GARY, NE (1967). A Method for Evaluating Honey Bee Flight Activity at the Hive Entrance. *Journal of Economic Entomology*, 60(1), 102–105.

GOETHE-UNIVERSITÄT FRANKFURT, INSTITUT FÜR BIENENKUNDE: <http://de.institut-fuer-bienenkunde.de>

HLNUG (2016): Beobachteter Klimawandel. *Klimawandel in Hessen*,
https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/klima/beobachteter_klimawandel.pdf

HOBOS (HONEY BEE ONLINE STUDIES): <http://www.hobos.de>

JULIUS KÜHN-INSTITUT (2008): Pressemitteilung, <https://idw-online.de/de/news260637>

MEIKLE WG, HOLST N (2014). Application of continuous monitoring of honeybee colonies. *Apidologie*, 46(1), 10–22.

MÜLLER AL, BIERTÜMPFEL A, FRIEDRITZ LENNART, DAUBER J (2014): The energy plant *Silphium perfoliatum* L. (Asteraceae) as a late pollen resource for the honey bee *Apis mellifera* L. *Mitt Entomol Verein Stuttgart*, 49(1), 42-43.

REKLIÉS (REGIONALE KLIMAPROJEKTIONEN ENSEMBLE FÜR DEUTSCHLAND):
<http://reklies.hlnug.de/home/>

REKLIÉS (2017): Ergebnisbericht. <http://reklies.hlnug.de/fileadmin/tmp/reklies/dokumente/ReKliEs-De-Ergebnisbericht.pdf>

SAMUELSSON P, JONES CG, WILLÉN U, ULLERSTIG A, GOLLVIK S, HANSSON U, JANSSON C, KJELLSTRÖM E, NIKULIN G, WYSER K (2011): The Rossby Centre Regional Climate model RCA3: model description and performance. *Tellus*, 63(1), 4–23.

STRUYE MH, MORTIER HJ, ARNOLD G, MINIGGIO C, BORNECK R (1994). Microprocessor-controlled monitoring of honeybee flight activity at the hive entrance. *Apidologie*, 25(4), 384-395.

Anhang

Modellparameter für die phänologischen Modelle Blühbeginn von Süßkirsche und Birne in Hessen

Chilling-Forcing-Modell für den Blühbeginn der **Süßkirsche**. Weitere Angaben zu den Modellparametern und Abkürzungen siehe Tab. 1, S. 22

Parameter	C* in CP	T _{BF} in °C	F* in PTU	EXPO (-)	MAE in d
	77.3	2.8	329.3	2.022	3 – 4

Chilling-Forcing-Modell für den Blühbeginn der **Birne**. Weitere Angaben zu den Modellparametern und Abkürzungen siehe Tab. 1, S. 22

Parameter	C* in CP	T _{BF} in °C	F* in PTU	EXPO (-)	MAE in d
	62.9	1.8	452.6	1.475	3 – 6

Potentieller Bienenflug (d)

	RCP	Z0	Z1	Z2	Z3
Jahr					
MPI-ESM	2.6	38.16 ^a	40.84 ^b	41.06 ^b	41.61 ^c
	4.5	38.16 ^a	40.01 ^b	41.37 ^c	43.73 ^d
	8.5	38.16 ^a	39.87 ^b	43.59 ^c	47.40 ^d
MOHC-HadGEM	2.6	38.72 ^a	43.64 ^b	43.30 ^b	42.34 ^c
	8.5	38.72 ^a	42.81 ^b	46.79 ^c	52.21 ^d
ICHEC-EC-EARTH	2.6	31.94 ^a	35.27 ^b	36.24 ^c	35.73 ^b
	8.5	31.94 ^a	34.92 ^b	40.05 ^c	43.95 ^d
Mittel	2.6	36.27 ^a	39.91^b	40.20^b	39.89^b
	8.5	36.27 ^a	39.20^b	43.48^c	47.85^d
Hauptblüte					
MPI-ESM	2.6	24.84 ^a	24.86 ^a	24.76 ^a	25.42 ^b
	4.5	24.84 ^a	24.81 ^a	24.82 ^a	24.94 ^a
	8.5	24.84 ^a	24.59 ^b	25.06 ^c	24.47 ^b
MOHC-HadGEM	2.6	24.79 ^a	25.43 ^b	24.92 ^a	24.51 ^c
	8.5	24.79 ^a	25.02 ^a	25.36 ^b	26.21 ^c
ICHEC-EC-EARTH	2.6	23.25 ^a	24.04 ^b	23.50 ^{ac}	23.70 ^c
	8.5	23.25 ^a	23.44 ^a	24.29 ^b	24.09 ^b
Mittel	2.6	24.29 ^a	24.78^b	24.39^a	24.54^c
	8.5	24.29 ^a	24.35^a	24.91^b	24.92^b

Obstblüte					
MPI-ESM	2.6	1.02 ^a	0.89 ^b	0.85 ^b	0.73 ^c
	4.5	1.02 ^a	0.84 ^b	0.77 ^c	0.81 ^{bc}
	8.5	1.02 ^a	0.86 ^b	0.79 ^c	0.48 ^d
MOHC-HadGEM	2.6	1.09 ^a	0.91 ^b	0.91 ^b	0.75 ^c
	8.5	1.09 ^a	0.68 ^b	0.70 ^b	0.59 ^c
ICHEC-EC-EARTH	2.6	0.86 ^a	0.97 ^b	0.99 ^b	0.93 ^c
	8.5	0.86 ^a	0.89 ^a	0.65 ^b	0.57 ^c
Mittel	2.6	0.99 ^a	0.92^b	0.92^b	0.80^c
	8.5	0.99 ^a	0.81^b	0.71^c	0.55^d

Z0 (historischer Lauf, 1971–2000), Z1 (2011–2040), Z2 (2041–2070) und Z3 (2071–2100)

Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in den Mittelwerten für das jeweilige Szenario (RCP 2.6, 4.5, 8.5) für $p < 0.1\%$.

Phänologie – Blühbeginn (DOY)

	RCP	Z0	Z1	Z2	Z3
Hasel					
MPI-ESM	2.6	51.9 ^a	46.2 ^b	45.4 ^b	38.2 ^c
	4.5	51.9 ^a	44.0 ^b	38.9 ^c	38.8 ^c
	8.5	51.9 ^a	45.7 ^b	42.2 ^c	31.1 ^d
MOHC-HadGEM	2.6	52.2 ^a	45.3 ^b	46.6 ^b	46.7 ^b
	8.5	52.2 ^a	40.4 ^b	39.9 ^b	35.6 ^c
ICHEC-EC-EARTH	2.6	58.9 ^a	58.6 ^a	55.2 ^b	51.1 ^c
	8.5	58.9 ^a	49.1 ^b	38.0 ^c	33.4 ^d
Mittel	2.6	54.3 ^a	50.1^b	49.1^b	45.3^c
	8.5	54.3 ^a	45.1^b	40.0^c	33.4^d
Süßkirsche					
MPI-ESM	2.6	112.0 ^a	108.4 ^b	105.8 ^c	105.4 ^c
	4.5	112.0 ^a	108.2 ^b	106.6 ^c	102.1 ^d
	8.5	112.0 ^a	109.7 ^b	102.0 ^c	94.1 ^d
MOHC-HadGEM	2.6	114.4 ^a	109.2 ^b	105.5 ^c	106.5 ^d
	8.5	114.4 ^a	107.5 ^b	102.2 ^c	96.0 ^d
ICHEC-EC-EARTH	2.6	121.3 ^a	119.9 ^b	113.4 ^c	114.4 ^d
	8.5	121.3 ^a	115.8 ^b	106.3 ^c	101.2 ^d
Mittel	2.6	115.9 ^a	112.5^b	108.3^c	108.8^c
	8.5	115.9 ^a	111.0^b	103.5^c	97.1^d

Birne					
MPI-ESM	2.6	116.5 ^a	112.2 ^b	110.2 ^c	108.9 ^d
	4.5	116.5 ^a	112.1 ^b	109.9 ^c	105.7 ^d
	8.5	116.5 ^a	113.5 ^b	105.5 ^c	96.2 ^d
MOHC-HadGEM	2.6	119.3 ^a	112.7 ^b	109.7 ^c	110.3 ^c
	8.5	119.3 ^a	110.8 ^b	105.5 ^c	97.6 ^d
ICHEC-EC-EARTH	2.6	126.3 ^a	124.6 ^b	118.5 ^c	119.2 ^c
	8.5	126.3 ^a	120.0 ^b	109.8 ^c	103.9 ^d
Mittel	2.6	120.7 ^a	116.5^b	112.8^c	112.8^c
	8.5	120.7 ^a	114.8^b	106.9^c	99.2^d
Sommerlinde					
MPI-ESM	2.6	177.8 ^a	171.7 ^b	173.1 ^c	172.4 ^{bc}
	4.5	177.8 ^a	173.7 ^b	170.0 ^c	167.1 ^d
	8.5	177.8 ^a	174.4 ^b	168.0 ^c	160.4 ^d
MOHC-HadGEM	2.6	177.8 ^a	169.5 ^b	170.0 ^b	171.1 ^c
	8.5	177.8 ^a	171.4 ^b	164.3 ^c	158.9 ^d
ICHEC-EC-EARTH	2.6	192.2 ^a	187.9 ^b	183.1 ^c	183.1 ^c
	8.5	192.2 ^a	185.3 ^b	173.8 ^c	167.9 ^d
Mittel	2.6	182.6 ^a	176.4^b	175.4^c	175.5^c
	8.5	182.6 ^a	177.1^b	168.7^c	162.4^d

Z0 (historischer Lauf, 1971–2000), Z1 (2011–2040), Z2 (2041–2070) und Z3 (2071–2100)

Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in den Mittelwerten für das jeweilige Szenario (RCP 2.6, 4.5, 8.5) für $p < 0.1\%$.

Phänologie – Dauer der Blühphasen (d)

	RCP	Z0	Z1	Z2	Z3
Dauer Hauptblüte					
MPI-ESM	2.6	146.9 ^a	146.5 ^a	148.6 ^b	155.2 ^c
	4.5	146.9 ^a	150.7 ^b	152.1 ^c	149.3 ^{bc}
	8.5	146.9 ^a	149.8 ^b	146.8 ^a	150.3 ^b
MOHC-HadGEM	2.6	146.5 ^a	145.2 ^{ab}	144.4 ^b	145.4 ^{ab}
	8.5	146.5 ^a	152.0 ^b	145.4 ^{ac}	144.3 ^c
ICHEC-EC-EARTH	2.6	154.3 ^a	150.2 ^b	148.8 ^{bc}	153.0 ^{ac}
	8.5	154.3 ^a	157.2 ^b	156.8 ^b	155.5 ^{ab}
Mittel	2.6	149.2 ^a	147.3^b	147.3^b	151.2^c
	8.5	149.2 ^a	153.0^b	149.7^a	150.0^a

Dauer Obstblüte					
MPI-ESM	2.6	18.5 ^a	17.8 ^b	18.4 ^a	17.6 ^c
	4.5	18.5 ^a	17.9 ^b	17.4 ^c	17.6 ^d
	8.5	18.5 ^a	17.8 ^b	17.6 ^c	16.1 ^d
MOHC-HadGEM	2.6	18.9 ^a	17.6 ^b	18.2 ^c	17.7 ^b
	8.5	18.9 ^a	17.3 ^b	17.3 ^b	15.6 ^c
ICHEC-EC-EARTH	2.6	19.0 ^a	18.7 ^b	19.0 ^a	18.9 ^a
	8.5	19.0 ^a	18.2 ^b	17.5 ^c	16.6 ^d
Mittel	2.6	18.8 ^a	18.0^b	18.5^c	18.1^b
	8.5	18.8 ^a	17.8^b	17.4^c	16.1^d

Z0 (historischer Lauf, 1971–2000), Z1 (2011–2040), Z2 (2041–2070) und Z3 (2071–2100)

Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in den Mittelwerten für das jeweilige Szenario (RCP 2.6, 4.5, 8.5) für $p < 0.1\%$.

Mittlere Lufttemperatur (°C)

	RCP	Z0	Z1	Z2	Z3
Jahr					
MPI-ESM	2.6	8.85 ^a	9.63 ^b	9.85 ^c	9.74 ^d
	4.5	8.85 ^a	9.55 ^b	9.95 ^c	10.55 ^d
	8.5	8.85 ^a	9.54 ^b	10.67 ^c	12.07 ^d
MOHC-HadGEM	2.6	8.70 ^a	10.28 ^b	10.31 ^b	10.43 ^c
	8.5	8.70 ^a	10.29 ^b	11.49 ^c	13.41 ^d
ICHEC-EC-EARTH	2.6	7.43 ^a	8.25 ^b	8.73 ^c	8.59 ^d
	8.5	7.43 ^a	8.59 ^b	9.84 ^c	11.26 ^d
Mittel	2.6	8.32 ^a	9.39^b	9.63^c	9.57^c
	8.5	8.32 ^a	9.47^b	10.67^c	12.22^d
Hauptblüte					
MPI-ESM	2.6	10.71 ^a	10.90 ^b	10.81 ^b	10.57 ^c
	4.5	10.71 ^a	10.73 ^a	10.68 ^a	11.02 ^b
	8.5	10.71 ^a	10.68 ^a	11.28 ^b	11.36 ^c
MOHC-HadGEM	2.6	10.77 ^a	11.26 ^b	11.33 ^b	11.49 ^c
	8.5	10.77 ^a	10.93 ^b	11.58 ^c	12.45 ^d
ICHEC-EC-EARTH	2.6	10.12 ^a	10.61 ^b	10.66 ^b	10.28 ^c
	8.5	10.12 ^a	10.19 ^a	10.56 ^b	10.76 ^c
Mittel	2.6	10.54 ^a	10.92^b	10.93^b	10.78^c
	8.5	10.54 ^a	10.60^a	11.14^b	11.52^c

Obstblüte					
MPI-ESM	2.6	10.89 ^a	11.06 ^b	10.18 ^c	10.29 ^c
	4.5	10.89 ^a	10.50 ^b	10.62 ^b	10.49 ^b
	8.5	10.89 ^a	10.77 ^{ab}	10.71 ^b	10.64 ^b
MOHC-HadGEM	2.6	10.57 ^a	11.35 ^b	10.96 ^c	10.75 ^a
	8.5	10.57 ^a	10.46 ^a	10.96 ^b	11.18 ^c
ICHEC-EC-EARTH	2.6	10.25 ^a	10.55 ^b	10.29 ^a	10.32 ^a
	8.5	10.25 ^{ab}	10.39 ^a	10.24 ^b	10.56 ^b
Mittel	2.6	10.57 ^a	10.99^b	10.48^{ac}	10.46^c
	8.5	10.57 ^{ab}	10.54^a	10.64^b	10.80^c

Z0 (historischer Lauf, 1971–2000), Z1 (2011–2040), Z2 (2041–2070) und Z3 (2071–2100)

Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in den Mittelwerten für das jeweilige Szenario (RCP 2.6, 4.5, 8.5) für $p < 0.1\%$.

Stunden mit einer Niederschlagshöhe > 2.4 mm/h

	RCP	Z0	Z1	Z2	Z3
Jahr					
MPI-ESM	2.6	19.65 ^a	19.83 ^a	21.48 ^b	22.17 ^b
	4.5	19.65 ^a	21.11 ^b	21.88 ^{bc}	22.59 ^c
	8.5	19.65 ^a	19.92 ^a	23.34 ^b	26.71 ^c
MOHC-HadGEM	2.6	10.96 ^a	14.24 ^b	17.19 ^c	15.86 ^d
	8.5	10.96 ^a	14.82 ^b	18.70 ^c	19.05 ^d
ICHEC-EC-EARTH	2.6	13.31 ^a	15.22 ^b	15.01 ^b	15.16 ^b
	8.5	13.31 ^a	16.36 ^b	17.33 ^c	18.35 ^d
Mittel	2.6	14.64 ^a	16.43^b	17.89^c	17.77^c
	8.5	14.64 ^a	17.04^b	19.79^c	21.42^d
Hauptblüte					
MPI-ESM	2.6	9.60 ^a	9.58 ^a	10.30 ^a	10.02 ^a
	4.5	9.60 ^a	11.12 ^b	9.76 ^a	9.46 ^a
	8.5	9.60 ^a	10.09 ^a	11.08 ^b	10.40 ^b
MOHC-HadGEM	2.6	5.66 ^a	6.48 ^b	8.71 ^c	7.61 ^d
	8.5	5.66 ^a	8.15 ^b	8.86 ^c	8.96 ^c
ICHEC-EC-EARTH	2.6	7.96 ^{ab}	8.35 ^{ab}	7.74 ^a	8.52 ^b
	8.5	7.96 ^a	8.48 ^a	8.07 ^a	9.16 ^b
Mittel	2.6	7.74 ^a	8.13^b	8.92^c	8.72^c
	8.5	7.74 ^a	8.91^b	9.34^c	9.51^c

Obstblüte					
MPI-ESM	2.6	1.00 ^a	1.24 ^b	1.07 ^a	1.17 ^a
	4.5	1.00 ^{ab}	0.97 ^{ab}	1.07 ^a	0.87 ^b
	8.5	1.00 ^a	1.27 ^b	0.92 ^a	1.19 ^b
MOHC-HadGEM	2.6	0.98 ^a	0.79 ^b	0.98 ^{ab}	1.03 ^{ab}
	8.5	0.98 ^a	0.85 ^a	0.91 ^a	0.49 ^b
ICHEC-EC-EARTH	2.6	0.87 ^a	1.55 ^b	0.90 ^{ac}	1.12 ^c
	8.5	0.87 ^{ab}	0.98 ^a	0.85 ^{ab}	0.73 ^b
Mittel	2.6	0.95 ^a	1.19^b	0.98^a	1.11^b
	8.5	0.95 ^{ab}	1.03^a	0.89^{bc}	0.80^c

Z0 (historischer Lauf, 1971–2000), Z1 (2011–2040), Z2 (2041–2070) und Z3 (2071–2100)

Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in den Mittelwerten für das jeweilige Szenario (RCP 2.6, 4.5, 8.5) für $p < 0.1\%$.

Stunden mit einer Windgeschwindigkeit > 3 m/s

	RCP	Z0	Z1	Z2	Z3
Jahr					
MPI-ESM	2.6	2149.67 ^a	2092.20 ^b	2048.42 ^b	2049.95 ^b
	4.5	2149.67 ^a	2129.10 ^a	2021.54 ^b	2063.22 ^b
	8.5	2149.67 ^a	2025.34 ^b	2080.93 ^c	2206.29 ^d
MOHC-HadGEM	2.6	2016.26 ^a	2010.09 ^a	1902.54 ^b	1786.01 ^c
	8.5	2016.26 ^a	1937.27 ^b	1856.44 ^c	1853.90 ^c
ICHEC-EC-EARTH	2.6	2184.76 ^a	2046.90 ^b	2024.62 ^b	2069.97 ^b
	8.5	2184.76 ^a	2092.89 ^b	2054.37 ^b	1970.76 ^c
Mittel	2.6	2116.90 ^a	2049.73^b	1991.86^c	1972.79^c
	8.5	2116.90 ^a	2018.50^b	1997.25^b	2013.87^b
Hauptblüte					
MPI-ESM	2.6	719.19 ^a	751.01 ^b	734.70 ^a	774.07 ^c
	4.5	719.19 ^a	805.76 ^b	781.97 ^b	804.66 ^b
	8.5	719.19 ^a	744.26 ^b	770.54 ^c	896.76 ^d
MOHC-HadGEM	2.6	736.64 ^a	766.57 ^b	773.20 ^b	736.57 ^a
	8.5	736.64 ^a	775.79 ^b	727.68 ^a	748.75 ^a
ICHEC-EC-EARTH	2.6	759.32 ^a	666.01 ^b	728.22 ^c	747.84 ^a
	8.5	759.32 ^a	797.73 ^b	848.32 ^c	811.49 ^b
Mittel	2.6	738.38 ^{ab}	727.86^a	745.37^{ab}	752.82^b
	8.5	738.38 ^a	772.59^b	782.18^b	819.00^c

Obstblüte					
MPI-ESM	2.6	77.71 ^a	79.44 ^a	89.52 ^b	93.20 ^b
	4.5	77.71 ^a	80.89 ^{ab}	84.04 ^b	91.89 ^c
	8.5	77.71 ^a	73.51 ^a	92.63 ^b	106.51 ^c
MOHC-HadGEM	2.6	86.89 ^a	79.65 ^b	92.31 ^c	86.64 ^{ac}
	8.5	86.89 ^a	79.74 ^b	91.87 ^c	92.33 ^c
ICHEC-EC-EARTH	2.6	84.93 ^a	75.84 ^b	99.39 ^c	98.89 ^c
	8.5	84.93 ^a	90.40 ^b	98.81 ^c	86.34 ^{ab}
Mittel	2.6	83.18 ^a	78.31^b	93.74^c	92.91^c
	8.5	83.18 ^a	81.21^a	94.44^b	95.06^b

Z0 (historischer Lauf, 1971–2000), Z1 (2011–2040), Z2 (2041–2070) und Z3 (2071–2100)

Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in den Mittelwerten für das jeweilige Szenario (RCP 2.6, 4.5, 8.5) für $p < 0.1\%$.

Stunden mit einer Globalstrahlung > 200 W/m²

	RCP	Z0	Z1	Z2	Z3
Jahr					
MPI-ESM	2.6	2328.78 ^a	2311.17 ^b	2317.11 ^{ab}	2345.58 ^c
	4.5	2328.78 ^a	2298.51 ^b	2274.90 ^c	2303.77 ^b
	8.5	2328.78 ^a	2306.30 ^b	2267.76 ^c	2253.47 ^c
MOHC-HadGEM	2.6	2423.80 ^a	2388.70 ^b	2391.61 ^b	2393.96 ^b
	8.5	2423.80 ^a	2395.65 ^b	2370.60 ^c	2362.28 ^c
ICHEC-EC-EARTH	2.6	2417.60 ^a	2415.17 ^a	2417.42 ^a	2409.13 ^a
	8.5	2417.60 ^a	2383.56 ^b	2399.69 ^c	2384.06 ^b
Mittel	2.6	2390.06 ^a	2371.68^b	2375.38^{bc}	2382.64^{ac}
	8.5	2390.06 ^a	2361.84^b	2346.02^b	2332.61^c
Hauptblüte					
MPI-ESM	2.6	1314.02 ^a	1266.81 ^b	1279.55 ^c	1317.20 ^a
	4.5	1314.02 ^a	1289.88 ^b	1251.07 ^c	1235.11 ^d
	8.5	1314.02 ^a	1288.67 ^b	1218.15 ^c	1154.13 ^d
MOHC-HadGEM	2.6	1345.07 ^a	1269.11 ^b	1258.74 ^c	1268.09 ^b
	8.5	1345.07 ^a	1294.34 ^b	1220.92 ^c	1164.09 ^d
ICHEC-EC-EARTH	2.6	1454.89 ^a	1406.00 ^b	1372.45 ^c	1403.25 ^b
	8.5	1454.89 ^a	1414.54 ^b	1342.59 ^c	1280.82 ^d
Mittel	2.6	1371.32 ^a	1313.97^b	1303.58^c	1329.51^d
	8.5	1371.32 ^a	1332.52^b	1260.55^c	1199.68^d

Obstblüte					
MPI-ESM	2.6	192.19 ^a	178.66 ^b	182.44 ^c	175.20 ^d
	4.5	192.19 ^a	180.71 ^b	168.98 ^c	171.31 ^c
	8.5	192.19 ^a	179.68 ^b	165.43 ^c	136.26 ^d
MOHC-HadGEM	2.6	202.17 ^a	180.35 ^b	182.32 ^b	174.99 ^c
	8.5	202.17 ^a	170.84 ^b	166.99 ^c	139.83 ^d
ICHEC-EC-EARTH	2.6	203.89 ^a	197.48 ^b	196.11 ^{bc}	194.39 ^c
	8.5	203.89 ^a	189.33 ^b	173.26 ^c	160.40 ^d
Mittel	2.6	199.42 ^a	185.50^b	186.96^b	181.53^c
	8.5	199.42 ^a	179.95^b	168.56^c	145.49^d

Z0 (historischer Lauf, 1971–2000), Z1 (2011–2040), Z2 (2041–2070) und Z3 (2071–2100)

Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in den Mittelwerten für das jeweilige Szenario (RCP 2.6, 4.5, 8.5) für $p < 0.1\%$.