



BIOMONITORING MIT **Honigbienen und KI**

MODELLSTADT KARLSRUHE - BERICHT 19/20

KARLSRUHE, 15.06.2021



INHALTS- VERZEICHNIS

03

Projektvorstellung

- 04 Motivation und Ablauf
- 07 Visuelles Monitoring
- 11 Algorithmenentwicklung
- 13 Veröffentlichungen

15

Bienen in Karlsruhe

- 16 Honigbienenenvorkommen nach Stadtteilen
- 18 Aktuelle Situation der Karlsruher Imkerei
- 20 Analyse des Polleneintrags in der Oststadt
- 22 Klimawandel, Bienen und Stadtbäume

23

Ergebnisse des Monitoring

- 24 Datenbasis
- 26 Grundlegende Muster
- 28 Einflussfaktoren des Pollenangebots
- 36 Regionale Entwicklungen

41

Anhang

- 41 Danksagungen
- 42 Quellen

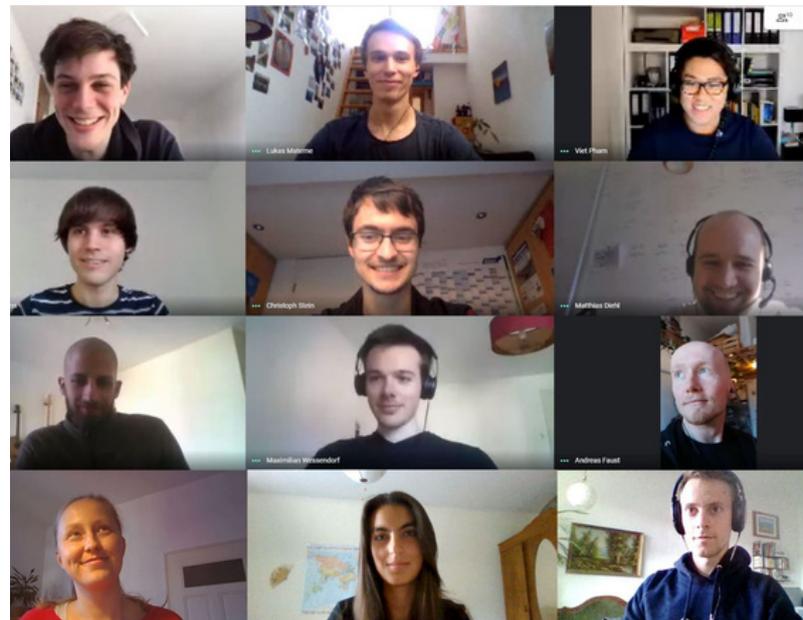


PROJEKT- VORSTELLUNG

In den vergangenen Jahrzehnten sind die Insektenvorkommen massiv zurückgegangen. Deutschlandweit sank ihre Anzahl gebietsweise um bis zu 75% [1]. Dass die bisherigen nationalen und internationalen Bemühungen am Rückgang der Artenvielfalt nichts ändern konnten, liegt insbesondere an erheblichen Wissenslücken. Bislang gab es noch keine Möglichkeit, systematisch und großflächig Daten darüber zu sammeln, wie sich Maßnahmen der Gestaltung von Flächen im Innen- und Außenbereich auf Insekten auswirken [2].

Mit apic.ai möchten wir das durch den Einsatz neuer Technologien wie künstlicher Intelligenz (KI) und Edge Computing ändern. Mithilfe unserer Monitoringsysteme, KI-Algorithmen und der Honigbiene als Biosensor wollen wir eine belastbare Datengrundlage schaffen. Auf ihrer Basis sollen Probleme identifiziert und Verbesserungen umgesetzt werden können. Mit Unterstützung der Stadt Karlsruhe machen wir das Stadtgebiet in den Jahren 2019 und 2020 zu einem Testfeld für die Erhebung und Auswertung dieser Daten.

Auf den folgenden Seiten stellen wir das Modellprojekt und die daraus hervorgegangenen Daten und Erkenntnisse vor.



“ *Das Bienensterben und Insektensterben geht uns alle an! Was uns aber bisher gefehlt hat, ist eine belastbare Datenbasis über die Art und das Ausmaß in Karlsruhe, sodass wir in der Lage sind, passgenaue Gegenmaßnahmen zu ergreifen.*

**David Hermanns,
SPD-Stadtrat 2019**



Motivation und
Ablauf





Bild: Philipp Hansert



Bild: Florian Kraft



Bild: Christoph Müller



Vielfältige Partnerschaften

Ohne eine Reihe von Unterstützer*innen wäre es nicht möglich, dem ambitionierte Ziel, die Gründe für das Insektensterben zu erforschen, nachzugehen. Das Vorhaben wurde neben der Stadt Karlsruhe durch die Unternehmen AUNOVIS, Baugenossenschaft Ardensia, Bee360, Stadtwerke Ettlingen, Cereda, Gebrüder Mende und IDS ermöglicht.

Viele legten im Rahmen der Zusammenarbeit Wildblumenwiesen mit meist einheimischen Pflanzen auf ihren Geländen an und verstärkten ihr Engagement zum Schutz der lokalen Biodiversität. Daneben leistete die Hoepfner Stiftung einen bedeutenden Beitrag. Durch ihr Stipendium Latitude49 erhielt apic.ai ein Büro, eine Werkstatt, Mentoring, ein einjähriges bedingungsloses Grundeinkommen und Fördergelder für den Bau von Prototypen.

Im öffentlichen Raum konnten zudem Daten am Karlsruher Bienenzüchterverein, im Zoologischen Stadtgarten und bei der katholischen Kirchengemeinde St. Cyriakus gesammelt werden. Bei der Gemeinschaft der Karlsruher Imker und auch in Öffentlichkeit und Politik stieß das Vorhaben auf großes Interesse.



Projektlauf 2019 und 2020

Produktion der 1. Generation witterungsbeständiger und energieautarker Prototypen

März - Mai '19

Test der Technologie im Rahmen einer ökotoxikologischen Studie zur Erfassung der Effekte eines Neonicotinoids

Oktober '19

Produktion und Installation der überarbeiteten, leistungsfähigeren 2. Prototypengeneration

März - Mai '20

Aufzeichnung von Foto- und Videodaten an Bienenstöcken im gesamten Stadtgebiet und Weiterentwicklung der Analyse-Algorithmen

November '20 - Juni '21

Januar - April '19

Ausbringung von jeweils zwei Prototypen an knapp 20 Standorten und Beginn der flächendeckenden Datenaufzeichnung 2019

Mai - September '19

Veröffentlichung der Ergebnisse einer Studie auf dem 14. Internationalen Symposium "Hazards of Pesticides to Bees" in Bern

Januar - Juli '20

Entwicklung und Validierung von Algorithmen zur Pollenerkennung, Publikation auf der ökotoxikologischen Konferenz SETAC SciCon

Juli - Oktober '20

Auswertung der gesammelten Daten aus dem Jahr 2020 und Aufbereitung der Ergebnisse der Untersuchungen beider Jahre



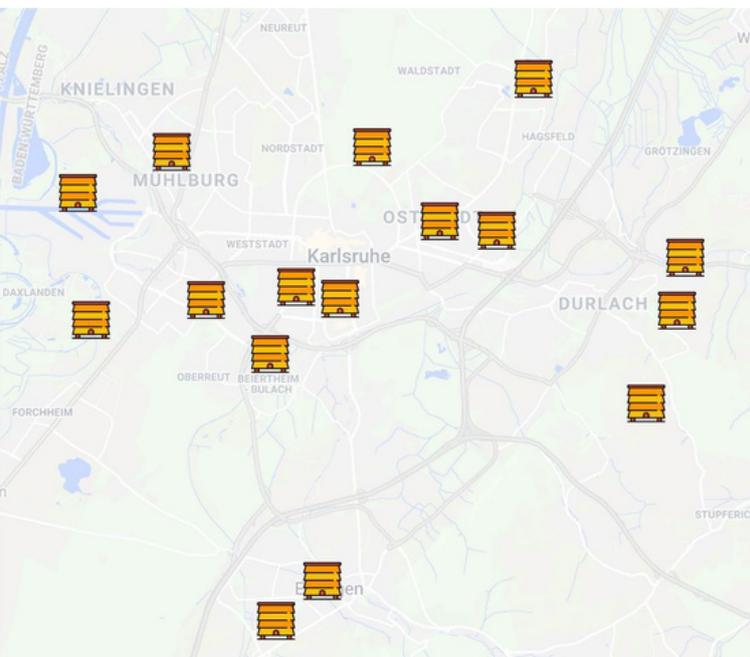
VISUELLES MONITORING

Hardware Infrastruktur

Im Jahr 2019 wurde die Infrastruktur zur Erhebung der Lebensbedingungen von Honigbienen und weiteren Bestäuberinsekten in verschiedenen Bereichen der Stadt Karlsruhe aufgesetzt. Dank zahlreicher engagierter Inker*innen konnte ein Netzwerk von 17 über die Region verteilten Standorten und einem Standort für Feldversuche in Bretten aufgebaut werden.



Bild: Florian Kraft



Je Standort wurden zwei Bienenstöcke mit einem Prototyp des kamerabasierten Monitoringsystems ausgestattet. Sie befanden sich bei Privatimkern und öffentlichen Einrichtungen, aber auch teilweise auf den Betriebsgeländen lokaler Unternehmen, die sich aktiv für das Vorhaben einsetzten.

Unter Berücksichtigung der verschiedenen Naturräume im Stadtgebiet wurden Standorte in der Rheinaue (Jüngere und Ältere Rheinaue), in der Hardtebene (Niederterrasse, Kinzig-Murg-Rinne, Albniederung) und in den Bergdörfern gewählt.

Im Jahr 2020 wurde die Anzahl der Standorte zur Reduktion des Abstimmungs- und Wartungsaufwands auf zwölf reduziert. Durch die Unterstützung von Unternehmen kamen Messpunkte in Lindau und im Schwarzwald hinzu.

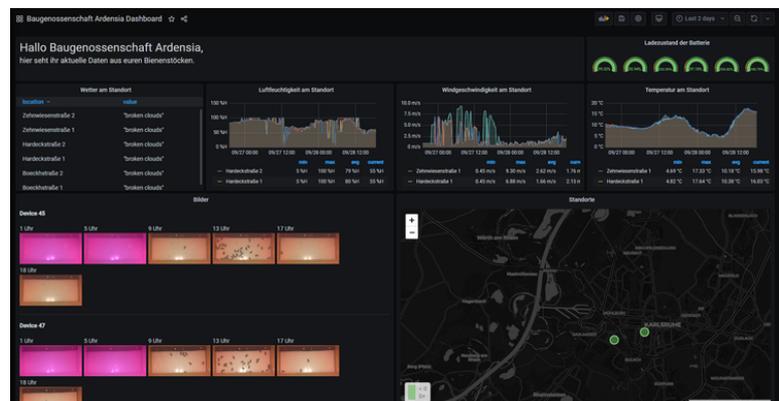
Erhebung der Bienenbilder

Die visuellen Monitoringsysteme werden am Eingang von Bienenstöcken installiert. Alle Bienen, die den Stock betreten oder verlassen, passieren das Sichtfeld der Kamera. Diese macht in regelmäßigen Zeitabschnitten Bilder. Ein integrierter Mikrocomputer, der über das Mobilfunknetz Verbindung zum Internet hat, sendet die Bilder an einen Server. Dort werden sie zunächst gespeichert und anschließend mit Algorithmen analysiert.

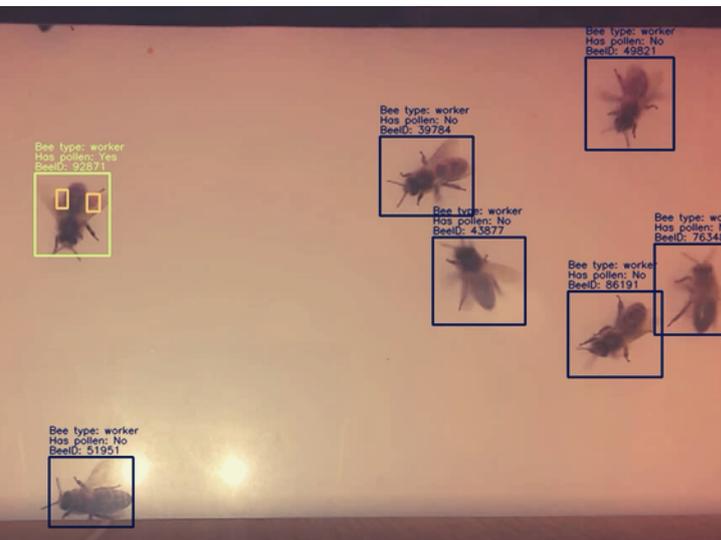
Durch die Internetverbindung ist es außerdem möglich, aus der Ferne auf die Systeme zuzugreifen, um zum Beispiel die Software darauf zu aktualisieren. Zudem können auf einem Dashboard Bilder aus den Bienenstöcken und Standortdaten zu Temperatur, Windgeschwindigkeit und Witterung angezeigt werden. An Standorten ohne Anschluss ans Stromnetz werden die Systeme durch Solarpanele betrieben.



Bild: Google



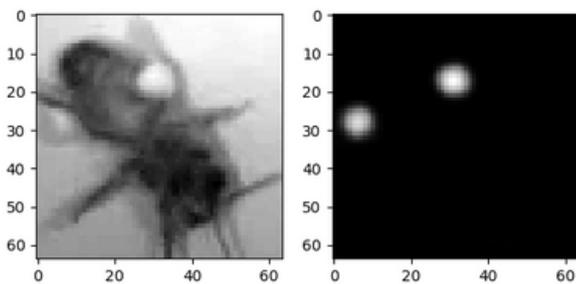
Damit die Algorithmen lernen die Bienen selbstständig zu erkennen, müssen sie zunächst trainiert werden. Dies geschieht durch die manuelle Annotation auf vielen Beispielbildern. Zum Training werden *Neuronalen Netzen* sehr viele annotierte Bilder von Bienen und Pollen gezeigt, bis sie lernen sie selbstständig zu erkennen. Gut instruierte, engagierte Karlsruherinnen und Karlsruher unterstützen bei der Annotation.



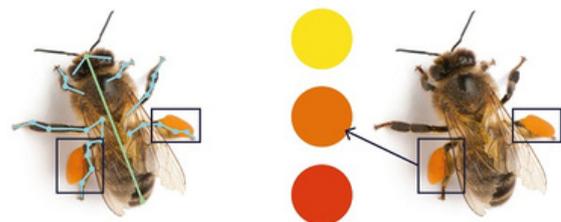
Auswertung der Bienenbilder

Bei der Auswertung wird analysiert, wie viele Bienen sich auf den Bildern befinden. Die Anzahl der Bienen im Bild im Tagesverlauf wird als Maß für die Aktivität der Völker genutzt.

Die auf den Bildern erkannten Bienen können in einem weiteren Verarbeitungsschritt auf bestimmte Merkmale hin untersucht werden, z.B. auf sog. *Pollenhöschen* an ihren Hinterbeinen. Der auf diesem Wege messbare quantitative Eintrag von Blütenpollen dient als Maß für die Bestäubungsaktivität und als Indikator für die Futterverfügbarkeit. Bei einem temporären Engpass spricht man von einer *Trachtlücke*. Die Feststellung von Trachtlücken könnte als Basis für gezielte Pflanzungen oder Bewässerungen dienen, um das Nahrungsangebot für Bestäuber während der gesamten Saison zu sichern. Trachtlücken sind insbesondere für Wildbienen und andere nicht ganzjährig aktive Bestäuber ein Risiko, da diese nicht wie Honigbienen große Futtervorräte anlegen und als Spezialisten teilweise vom Vorkommen bestimmter Trachtpflanzen abhängig sind.



Ab 2021 werden durch apic.ai wissenschaftliche Versuche dazu durchgeführt, anhand der Vielfalt der Pollenhöschen-Farben auf die Diversität der lokalen Flora zu schließen. Als Teststand dient auch an mindestens einem der Karlsruher Messpunkte. Gefördert wird das Forschungsvorhaben im Rahmen eines vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft geförderten Projektes u.a. mit den Karlsruher Partnern FZI Forschungszentrum Informatik und Disy Informationssysteme.

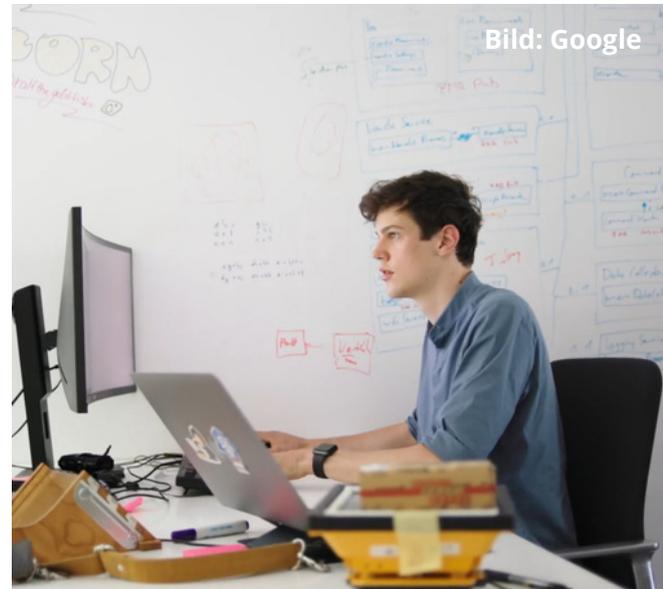


Erfahrungen und Anpassungen

Auf Basis der Erfahrungen der Imker im Jahr 2019 wurden die Prototypen für das Jahr 2020 hardwareseitig weiterentwickelt. Um "Stau" zu vermeiden und die visuelle Auswertung der Bilder zu erleichtern, wurde der Eingangsbereich vergrößert. Weiterhin wurde aufgrund der Bedenken einzelner Imker hinsichtlich einer Beeinträchtigung der Bienen durch Mobilfunkwellen die zuvor integrierte Mobilfunkeinheit außerhalb des Systems verlegt.

Eine Herausforderung stellte die zum Teil schlechte Internetverfügbarkeit dar. Sie hatte zur Folge, dass Updates der Systeme nur vor Ort, statt wie geplant aus der Ferne durchgeführt werden konnten.

Eines der großen Ziele von apic.ai ist die Erfassung von Bienenverlusten, also der Bestimmung des Anteils der Bienen, die nach dem Verlassen des Stocks nicht zurückkehren. Dies erfordert eine kontinuierliche Erfassung aller Tiere. Die dafür erforderliche Menge an Bildmaterial ist zu groß, um über das Mobilfunknetz übertragen zu werden. Eine lokale Auswertung der Bilder auf den Systemen selbst wäre eine Lösung. Im Jahr 2020 wurde ein Hardwarebeschleuniger der neuesten Generation in die Systeme eingebaut, um die Realisierbarkeit der Zielsetzung zu testen. Die Leistung reichte jedoch nicht aus. Darum wurde an drei Standorten Videomaterial zur Auswertung im Rahmen von zukünftigen Forschungsprojekten mit Cloudressourcen aufgezeichnet.



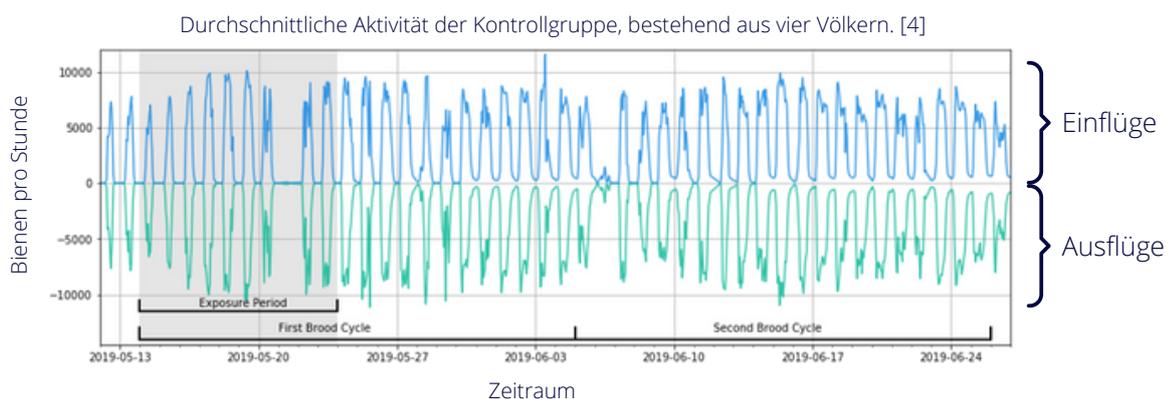
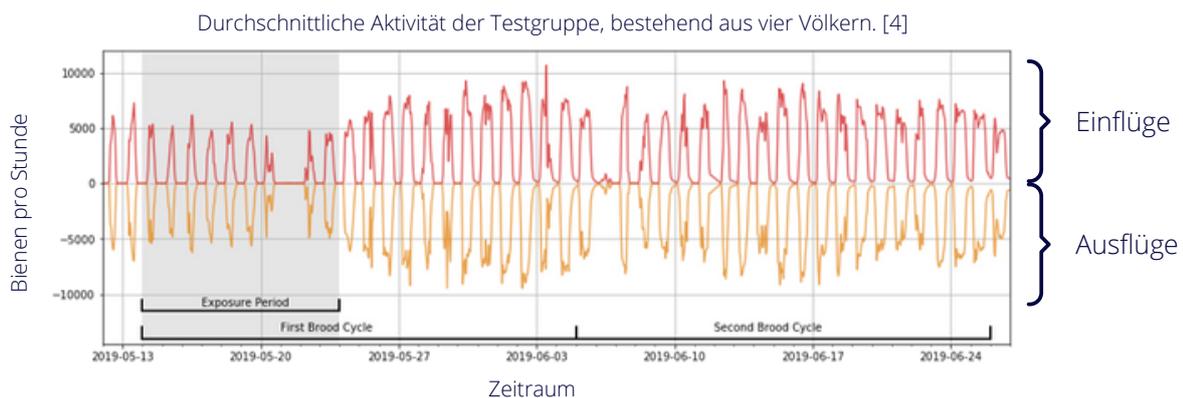
Algorithmenentwicklung



Bienenaktivität

Die im Jahr 2019 für die Bienenerkennung entwickelten Algorithmen wurden im Rahmen einer ökotoxikologischen Feldstudie in der Nähe von Bretten validiert. Durch die Gestaltung des Studienaufbaus war es zudem möglich zu testen, ob das bienenbasierte Monitoring geeignet ist den Einfluss von Pflanzenschutzmitteln zu messen. Dafür wurden in einer sog. *Oomen Fütterungsstudie* acht Honigbienen-völker zu gleichen Teilen in eine Testgruppe und eine Kontrollgruppe aufgeteilt. Die Testgruppe wurde über den Zeitraum von zehn Tagen einer nicht tödlichen Dosis des in der EU bereits verbotenen Neonicotinoids *Imidacloprid* ausgesetzt, die Kontrollgruppe nicht. Anschließend wurden die Auswirkungen auf Aktivität und der Polleneintrag verglichen. Ziel des Versuchs war herauszufinden, ob die apic.ai Technologie schädliche Effekte messbar machen kann, die mit bestehenden Methoden nicht sichtbar sind. Bei Neonicotinoiden handelt es sich um die Wirkstoffgruppe, welche schon seit Mitte der 2000er Jahre in Verdacht steht am Insektensterben mit verantwortlich zu sein und aus welcher in den letzten Jahren bereits mehrere Wirkstoffe EU-weit auf Grund des Nachweises der Bienentoxizität verboten wurden.

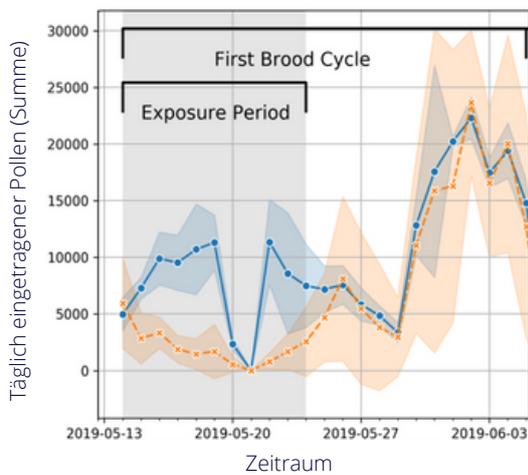
In Summe wurden bei dem Pilotversuch 14,4 Terrabyte Videomaterial aufgezeichnet und ausgewertet. Es konnte gemessen werden, dass die Aktivität der Testgruppe im Vergleich zur Kontrollgruppe im Kontaktzeitraum (grau hinterlegt) deutlich zurückging. [3] Die Ergebnisse wurden auf dem 14. Internationalen Symposium: *Hazards of Pesticides to Bees der International Commission of Plant Pollinator Relationships* in Bern vorgestellt.



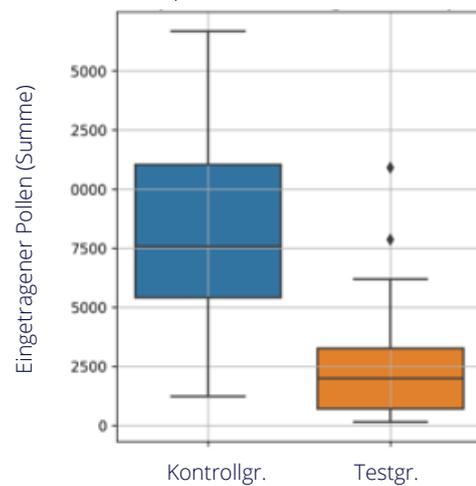
Polleneintrag

Die gleichen Daten, die zuvor für die Bestimmung von Aktivitätsänderungen genutzt worden waren, wurden auch ausgewertet, um die Algorithmen zur Pollendetektion zu validieren. Der Polleneintrag ist ein Indikator für die Intensität der Bestäubungsaktivität und für die Volkentwicklung (Nahrungsquelle für Bienenlarven). Es konnte festgestellt werden, dass durch den Einfluss des Neonicotinoids *Imidacloprid* sowohl der Polleneintrag in Summe zurückging (links) als auch der relative Anteil der Pollensammlerinnen unter allen Bienen, die die Stöcke betraten. Der Effekt trat nur während des Expositionszeitraumes auf, eine Langzeitwirkung war nicht erkennbar. [3]

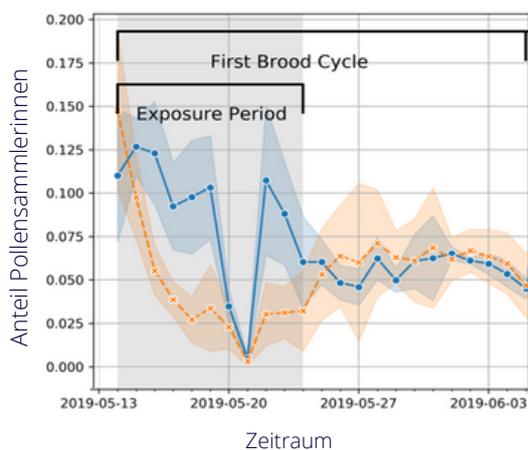
Polleneintrag während und nach der Exposition in Summe. [3]



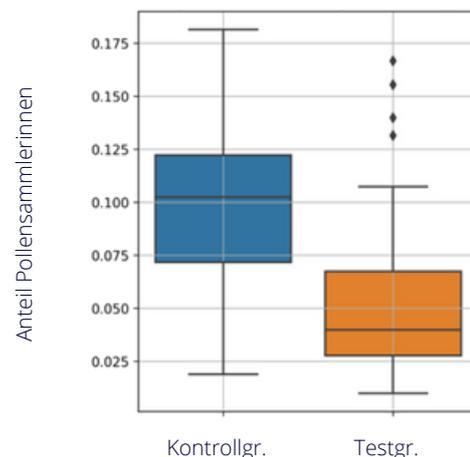
Polleneintrag während der Exposition in Summe. [3]



Anteil der Pollensammlerinnen während und nach der Exposition. [3]



Anteil der Pollensammlerinnen während der Exposition. [3]



Legende	Testgruppe	Kontrollgruppe	Schattiert: 95. Perzentil
----------------	------------	----------------	---------------------------

Veröffentlichungen

Wissenschaftliche Publikationen

Auf Konferenzen in Bern (Schweiz) und Seoul (Südkorea) sowie coronabedingt im virtuellen Raum konnten Forschungsergebnisse präsentiert werden. Es folgt eine kurze Übersicht über alle Publikationen aus den Jahren 2019 und 2020. Die u.a. durch die Erfahrungen mit dem Monitoring der Stadt Karlsruhe eruierten Ergebnisse werden auf den beiden folgenden Seiten vorgestellt.



Veröffentlichungen im Bereich Ökotoxikologie

Tausch, F.; Diehl, M.; Schmidt, K. (2020). Current achievement and future developments of a novel AI based visual monitoring of beehives in ecotoxicology and for a monitoring of landscape structures. Proceedings of the 14th International Symposium Hazards of Pesticides to Bees. 2019.

Gonsior, G.; Tausch, F.J. et. al. (2020). Impact of imidacloprid on honey bee activity during feeding in an Oomen study. Proceedings of the 14th International Symposium Hazards of Pesticides to Bees. 2019.

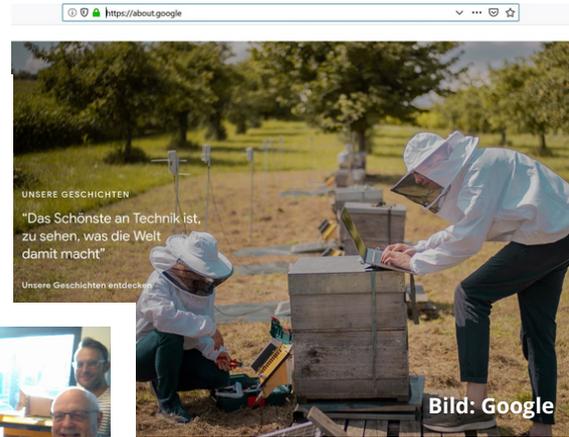
Knaebe, S; Tausch, F.; Schmidt, K.; Gonsior, G. (2020). A feeding experiment with a sublethal neonicotinoid dosage: Effects observed with traditional assessment methods and a novel AI supported bee counter. SETAC Europe 30th Annual Meeting Open Science for Enhanced Environmental Protection. .

Tausch, F.; Schmidt, K.; Diehl, M. (2020). Quantification of pollen intake as a behavioral endpoint for foraging activity in ecotoxicological risk assessment. SETAC Europe 30th Annual Meeting Open Science for Enhanced Environmental Protection.

Veröffentlichungen im Bereich Maschinelles Lernen

Marstaller, J.; Tausch, F.; Stock, S. (2019). DeepBees – Building and Scaling Convolutional Neuronal Nets For Fast and Large-scale Visual Monitoring of Bee Hives. Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision Workshops.

Tausch, F.; Stock, S; Fricke, J.; Klein, O. (2020). Bumblebee Re-Identification Dataset. The IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV) Workshops, 2020, pp. 35-37.



Öffentliche Berichterstattung

Highlights der Jahre 2019 und 2020, die das regionale, nationale und internationale Interesse an apic.ai und dem Forschungsansatz zeigen, sind:

- Mehr als 1,5 Millionen Aufrufe eines Videobeitrags über apic.ai von Google <https://www.youtube.com/watch?v=sgCGHBek1To>.
- Auszeichnung beim Gründerwettbewerb Digitale Innovationen des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie.
- Zahlreiche Fachgespräche bei Messen und Konferenzen sowohl im Bereich der Entomologie als auch des Maschinellen Lernens.
- Besuche verschiedener Parteien, Unternehmen, Forschungseinrichtungen und der EU-Kommission.
- Zahlreiche Zeitungsartikel, TV-Beiträge, Radiosendungen und weitere Beiträge in Online-Blogs etc.
- Erfolgreiche Förderanträge für teils konsortiale Forschungsprojekte von BMEL und BMBF.

“*Bienen sollen Daten zum Kampf gegen das Bienensterben liefern. Klingt verrückt, ist aber die Geschäftsidee des Karlsruher Startups apic.ai.*

Ekart Kinkel, techtag.de



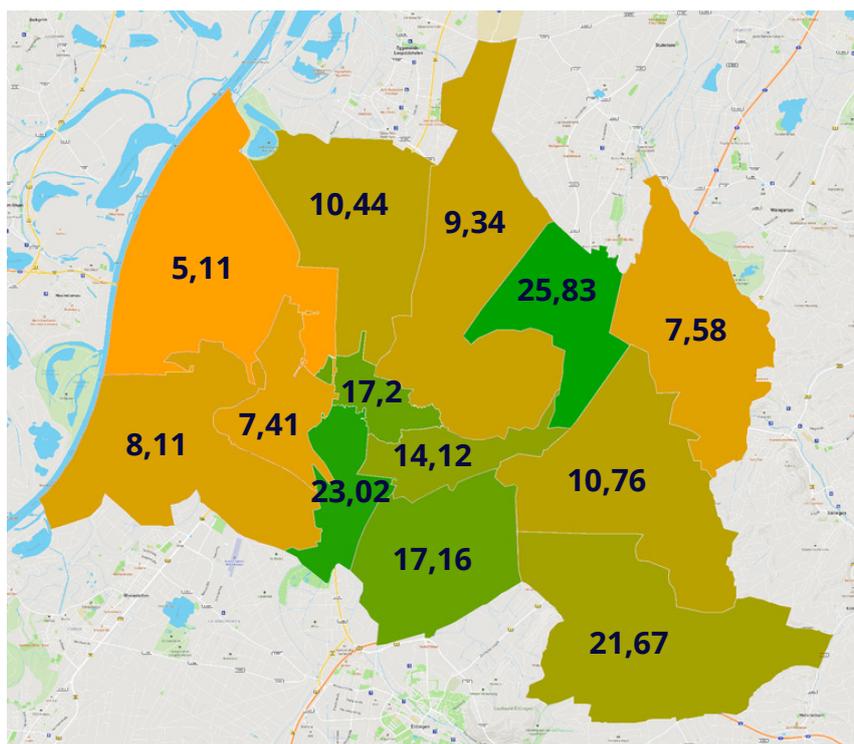
BIENEN IN KARLSRUHE

Im folgenden Abschnitt wird einen Überblick über die Zahlen, Daten und Fakten zu Honigbienen und Imkerei in Karlsruhe geschaffen. Die Daten basieren auf einer Mitgliedererhebung des Bienenzüchtervereins Karlsruhe e.V. und Daten des Veterinäramts Karlsruhe, welche apic.ai zur Verfügung gestellt wurden, sowie auf einer von apic.ai durchgeführten Umfrage unter den Karlsruher Imker*innen. Diese manuell erhobenen Daten dienen als Realitätsabgleich der bisher einzigartigen Methode.

Honigbienenenvorkommen nach STADTTEILEN

In vom Veterinäramt bereitgestellten Daten [5] wird sichtbar, dass die Dichte der insgesamt 1.939 im Jahr 2020 im Stadtgebiet Karlsruhe angesiedelten Bienenvölker variiert. Die Karte bildet die Anzahl der Bienenstöcke pro km² in den verschiedenen Postleitzahlgebieten innerhalb Karlsruhe ab. Dabei fällt auf, dass in Grötzingen, Daxlanden und Knielingen in Relation zur Fläche weniger Bienenstöcke bewirtschaftet werden. In der Waldstadt, Bulach und Beiertheim werden die meisten Bienenvölker gehalten.

Anzahl gemeldeter Bienenstöcke pro km² in den verschiedenen Postleitzahlgebieten.



INSGESAMT

1.939

BIENENSTÖCKE
IN 2020

CIRCA

70

HONIGBIENEN
PRO
EINWOHNER

DURCHSCHNITTLICH

34

AKTIVE IMKER PRO
KARLSRUHER
POSTLEITZAHL

Konkurrenz zwischen Honig- und Wildbienen?

Das Thema einer möglichen Nahrungskonkurrenz von Honig- und Wildbienen wurde im Rahmen der vorliegenden Studie nicht untersucht. Da speziell im Jahr 2019 jedoch sehr geringe Honigerträge gemessen wurden und dies auf temporäre Nahrungsengpässe schließen lässt, wird das Thema dennoch adressiert. Leider gibt es nur eine übersichtliche Zahl wissenschaftlicher Veröffentlichungen, es liegen jedoch je eine Stellungnahme von der Deutschen Wildtierstiftung und der Arbeitsgemeinschaft der Institute für Bienenforschung vor. Im Folgenden wird eine kurze Zusammenfassung gegeben. Für genauere Einblicke empfiehlt es sich jedoch die Papiere direkt zu studieren.



Die Deutsche Wildtierstiftung stellt die Befürchtungen wie folgt dar: Honigbienenvölker umfassen bis zu 50.000 Tiere und haben einen hohen Bedarf an Nektar und Pollen. Der Name der Honigbiene begründet sich auf ihrer Eigenschaft, Nektar in Form von Honig als Nahrungsvorrat anzulegen. Das macht sie weniger anfällig gegenüber temporären Nahrungsengpässen. Zudem ist sie polylektisch, das bedeutet, sie kann sich von einer Vielzahl von Pflanzen ernähren. Sie fliegt bei der Nahrungssuche mehrere Kilometer weit. Bei den meisten Wildbienen verhält es sich anders. Da sie keine Vorräte anlegen, können sie in Folge temporärer Nahrungsengpässe in Not geraten, hungern oder weniger Nachkommen hervorbringen. Zudem sind viele Wildbienen auf wenige bis einzelne Futterpflanzen spezialisiert und sammeln nur im Umkreis von ca. 1 km Nahrung. Wenn nicht ausreichend viel Nahrung zur Verfügung steht, könnte folglich eine Konkurrenzsituation entstehen. [6]

Die AG der Institute für Bienenforschung kommt zu dem Schluss, dass die Gegenwart von Honigbienen, zumindest in ihrem angestammten Verbreitungsgebiet, keine Gefahr für das Vorkommen von Wildbienen darstellt. Nachgewiesenermaßen bedrohlich für Wildbienen seien jedoch der Verlust von Lebensraum durch Habitatzerstörung und -fragmentierung, die Überdüngung von Magerstandorten, der Klimawandel und diverse Pflanzenschutzmittel. Überdies wird die Befürchtung geäußert, dass durch einen Diskurs zwischen Bienenhaltern und Naturschützern die besagten eigentlichen Gefahren aus dem Fokus geraten. [7]

Darüber, inwiefern die auf der vorherigen Seite beschriebene Dichte von Honigbienenvölkern in Karlsruhe eine Konkurrenzsituation provozieren könnte, lässt sich hier keine Aussage treffen. Beide Stellungnahmen sind sich jedoch darüber einig, dass die beste Gegenmaßnahme eine Verbesserung der lokalen Bestäuberfauna ist, z.B. durch die Erhöhung des Blütenangebotes und die Schaffung von geeigneten Nistmöglichkeiten.



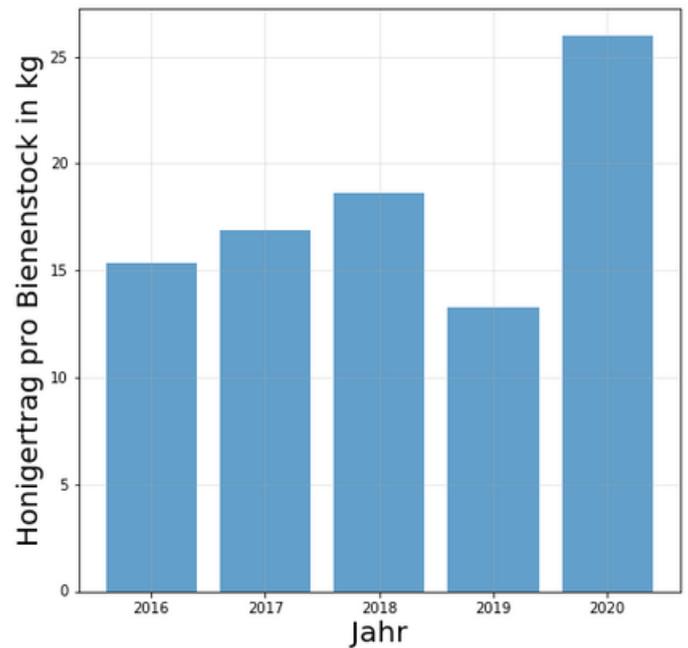
Aktuelle Situation der Karlsruher IMKEREI

Von den 365 Mitglieder des Bienenzüchtervereins Karlsruhe e.V. sind 68 % erst in den vergangenen sechs Jahren beigetreten. Dies zeigt das steigende Interesse der Bevölkerung am Insektenschutz. [8] Bei einer Umfrage von apic.ai beteiligten sich 24 Imker aller Stadtteile, die im Jahr 2020 insgesamt 110 Völker betreuten.

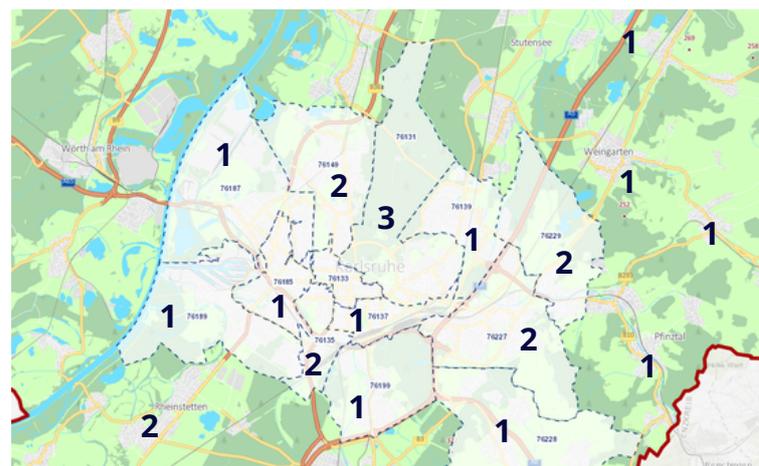
Bezogen auf die Honigernte war 2019 ein sehr schlechtes und 2020 ein sehr gutes Jahr. Die Umfrage unter den Imkern des Bienenzüchtervereins Karlsruhe (siehe oberes Bild) ergab dabei eine ähnliche Tendenz wie eine Befragung des Fachzentrums Bienen und Imkerei in Mayen (siehe nächste Seite). Die schlechten Erträge 2019 waren nicht auf Karlsruhe beschränkt, sondern in ganz Baden-Württemberg zu beobachten [9] [10]. Eine Übersicht über die möglicherweise verantwortlichen Witterungs- faktoren findet sich auf der folgenden Seite.

Wie das Veterinäramt mitteilte, wurde im Jahr 2019 kein Fall Amerikanischer Faulbrut gemeldet. Aus der Befragung der Karlsruher Imkerinnen und Imker gingen einzelne Fälle von Schwarzsucht und mutmaßlich Bienenparalysevirus hervor, was jedoch nicht ungewöhnlich ist [5].

Umfrageergebnis: Honigertrag pro Bienenstock in kg von 2016 bis 2020. Quelle: Eigene Umfrage.



Umfrageergebnis: Verteilung der Beantwortungen auf die einzelnen Postleitzahlengebiete



IM JAHR 2020

365

MITGLIEDER IM
VEREIN

CIRCA

40 %

SIND JÜNGER
ALS 50 JAHRE

KNAPP

30 %

DER MITGLIEDER
SIND WEIBLICH

Einflussfaktoren des Nektarangebots

Hohe Honigerträge lassen auf ein großes Nektarangebot schließen, geringe könnten ein Zeichen für temporäre Nahrungsengpässe sein. Um solche Zeiträume im Projektverlauf zu identifizieren, wurden die Ertragszahlen untersucht. Grob lassen sich die Monate April und Mai der Frühtracht und die Monate Juni und Juli der Sommertracht zuordnen. Laut einer Befragung von Karlsruher Imkern durch das Fachzentrum Bienen und Imkerei in Mayen lag die Frühtrachternte im Jahr 2020 in Karlsruhe mit 16,7 kg im Vergleich zu 3,8 kg im Vorjahr deutlich höher. Auch die Sommertracht war mit 24,3 kg höher als die 12,1 kg im Jahr 2019. Die abgefragten Werte umfassen auch potenzielle Honigerträge von Imkern, die keinen Honig ernten. Eine vergleichende Gegenüberstellung der Witterungsbedingungen lässt folgende Vermutungen zu, die jedoch mit Daten von mehr Jahren bestätigt werden müssten:

Ein kaltes und nasses Frühjahr mit wenig Sonnenstunden scheint sich negativ auszuwirken. Viele Sonnenstunden mit Niederschlägen zwischen 40 und 70 l/m² im Mai scheinen sich günstig auszuwirken.

FRÜHTRACHT Übersicht Frühtrachterträge und Witterungsfaktoren [14], [15], [16], [9], [11].

	2017		2018		2019		2020	
	April	Mai	April	Mai	April	Mai	April	Mai
Mittlere Temperatur (°C)	9,6	16,2	14,0	16,9	10,8	12,5	12,6	14,4
Min. Temperatur (°C)	-3,4	1,1	-0,7	2,6	-0,6	-0,5	-4,2	-0,3
Max. Temperatur (°C)	25,3	33,2	28,7	29,6	26,6	25,5	25,1	27,0
Sonnenstunden (h)	208,8	245,8	241,0	256,2	172,4	215,8	309,4	273,2
Niederschlag (l/m²)	19,8	64,0	29,5	71,9	38,5	106,0	5,6	46,1
Honigertrag (kg)	11,5		19,1		3,8		16,7	

Große Hitze über 37 °C scheint sich negativ auf den Nektareintrag auszuwirken. In Jahren mit Niederschlägen über 70 l/m² im Juni wurden höhere Sommertrachternten erreicht. Niederschlagsmengen im Juli scheinen schienen in den betrachteten Jahren keinen Einfluss zu haben.

SOMMERTRACHT Übersicht Sommertrachterträge und Witterungsfaktoren [14], [18], [19], [13], [12].

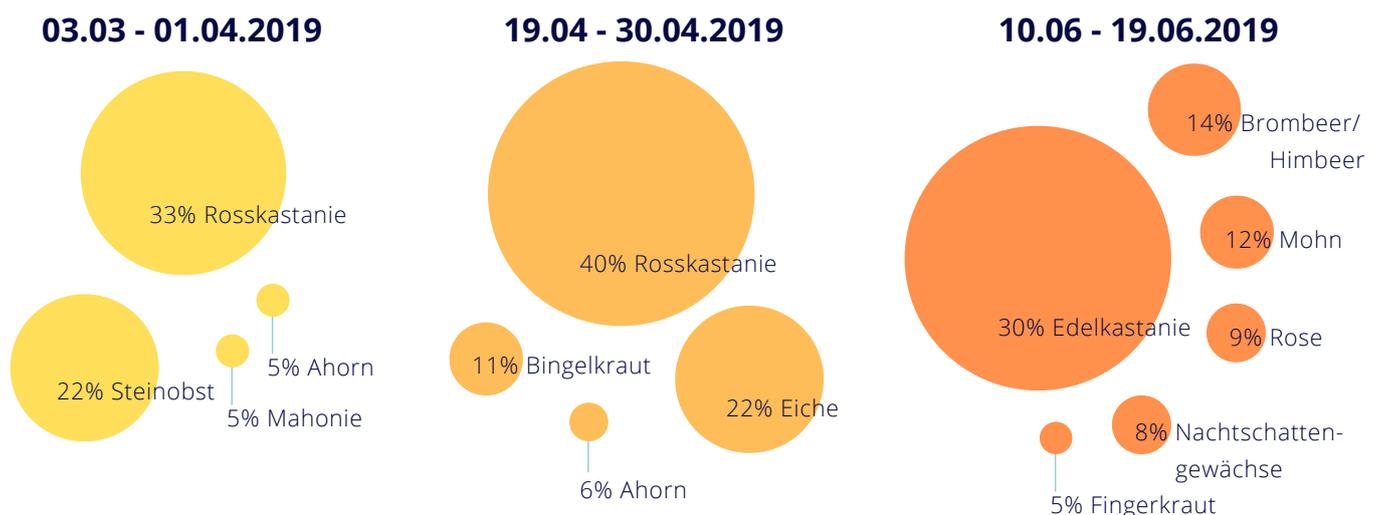
	2017		2018		2019		2020	
	Juni	Juli	Juni	Juli	Juni	Juli	Juni	Juli
Mittlere Temperatur (°C)	20,4	20,9	20,0	22,5	20,9	21,3	18,4	21,0
Min. Temperatur (°C)	6,4	10,4	6,1	10,7	7,0	6,9	8,7	7,7
Max. Temperatur (°C)	34,7	34,7	31,8	36,0	37,3	39,2	30,3	36,7
Sonnenstunden (h)	281,9	220,5	257,6	322,3	307,1	301,9	203,3	313,1
Niederschlag (l/m²)	71,5	102,8	48,0	53,6	51,4	50,8	73,0	17,4
Honigertrag (kg)	16,1		15,8		10,0		23,3	

Analyse des Polleneintrags in der OSTSTADT

Für die Oststadt wurde noch eine genauere Betrachtung des Nahrungsangebotes der Bienen vorgenommen. Im Jahr 2019 beteiligte sich apic.ai am Forschungsprojekt *Pollensammeln in Baden-Württemberg* der Landesanstalt für Bienenkunde an der Universität Hohenheim (finanziert durch das Ministerium für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg). In diesem Rahmen wurde in drei Zeiträumen von je sieben bis 14 Tagen auf dem Hoepfner Gelände in der Karlsruher Oststadt der von einem Honigbienenvolk eingetragene Pollen gesammelt und zur Untersuchung in ein Labor geschickt. Bei der mikroskopischen Pollenanalyse wurde die Zusammensetzung des Pollens in Bezug auf die Pflanzen analysiert, von denen er gesammelt wurde und auf Rückstände untersucht.

Von welchen Pflanzen die Bienen am meisten Pollen sammelten, kann der Grafik entnommen werden. Neben diesen Haupttrachtquellen gab es in jedem Zeitraum noch 17-20 Pflanzen bzw. Pflanzengattungen, die weniger als fünf Prozent des Polleneintrags ausmachten, sowie einen Teil, der nicht eindeutig zugeordnet werden konnte. Die Vielfalt des Pflanzenangebotes in der Oststadt ist entsprechend als sehr hoch einzuschätzen. Dies ist möglicherweise auch durch die Nähe zum botanischen Garten des Karlsruher Instituts für Technologie bedingt. [23]

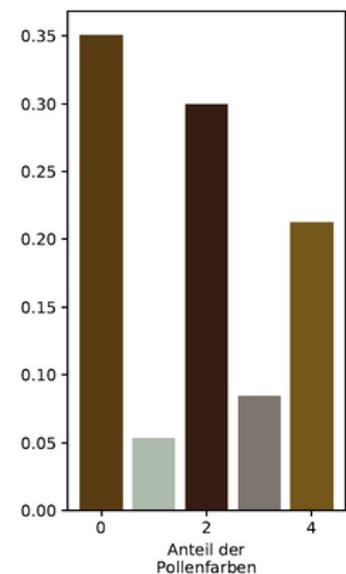
Ergebnisse der Pollenanalyse eines Bienenvolkes in der Oststadt zu drei Zeiträumen [23].



Die große Bedeutung der Roskastanie könnte zukünftig zumindest in der Oststadt ein Problem darstellen, da diese besonders stark unter der Trockenheit leidet [24]. Um die Entwicklung der Tracht einzelner Pflanzenarten besser verstehen zu können und die Vielfalt der lokalen Flora ganzjährig zu untersuchen, ist weitere Forschung notwendig. Ziel von apic.ai ist es, die Pflanzenvielfalt zukünftig durch eine KI-gestützte Bildanalyse der Farben der Pollen automatisiert zu erfassen, mit denen die Bienen den Stock betreten.

Bienen sind blütenstet, das bedeutet, sie fliegen bei jedem Sammelflug von Blüte zu Blüte nur Pflanzen einer Art an. Da sich die Pollen dieser Pflanzen farblich unterscheiden kann die Vielfalt der Farben als Indikator der lokalen, saisonalen Diversität genutzt werden.

Um die Machbarkeit dieses Unterfangens zu prüfen, wurde die Pollenprobe aus dem Juni, vor der Laboranalyse händisch nach Farben sortiert (linkes Bild). Die farbliche Zusammensetzung (mittleres Bild) entsprach in etwa der Zusammensetzung der Ergebnisse der Laboranalyse. Heraus sticht auch hier der große Anteil von Kastanienpollen mit dunkelroter Färbung. Eine maschinelle Bildanalyse einer unsortierten Pollenprobe (rechtes Bild) wies vielversprechende Ergebnisse auf. Diese sollen im Rahmen eines vom BMEL geförderten Forschungsprojektes ab Juni 2021 fortgeführt werden.



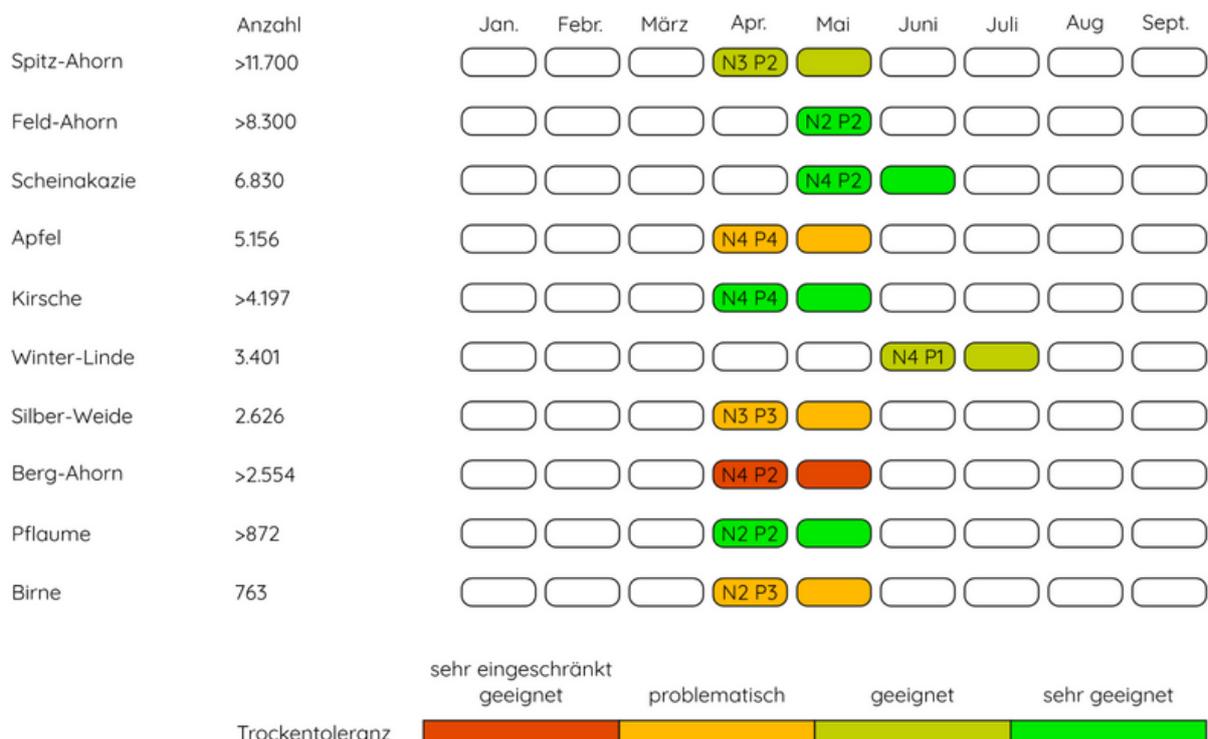
Weiterhin wurden die Pollenproben auf Rückstände von zwölf Insektiziden, 31 Fungiziden, 9 Herbiziden und einem Pflanzenregulator getestet. Fast alle Proben wiesen keine messbaren Rückstände auf. Lediglich im dritten Testzeitraum (10.-19. Juni 2019) wurden Rückstände des Fungizids Bitertanol gefunden, welches im Obst- und Gemüsebau Anwendung findet. Die Konzentration der Rückstände lag jedoch unter $< 10 \mu\text{g}/\text{kg}$, was für Bienenprodukte als unkritisch betrachtet wird [23].

Bei einer vierten analysierten Pollenprobe aus dem Juli wurde eine sehr hohe Belastung mit Pyrrolizidinalkaloiden von $> 1.000 \mu\text{g}/\text{kg}$ festgestellt. Pyrrolizidinalkaloide (PA) sind eine Gruppe sekundärer Pflanzenstoffe, die von ca. 3% der blühenden Pflanzen weltweit zum Schutz vor Fraßfeinden gebildet werden. Zu den Hauptquellen der PA gehören Pflanzen der Korbblütler, Raubblattgewächse und Hülsenfrüchtler. In Deutschland sind hauptsächlich Pflanzen wie das Jakobskreuzkraut, der Natternkopf, der Borretsch und der gewöhnliche Wasserdost dafür bekannt PA zu produzieren. PA können durch beständige Aufnahme im Körper Leberschädigungen auslösen und stehen im Verdacht krebserregend zu sein. Somit stellen sie ein potenzielles Gesundheitsrisiko für den Menschen dar. Basierend auf der von der Europäischen Lebensmittelsicherheitsbehörde angegebenen Tagesdosis für Pyrrolizidinalkaloide ($0.024 \mu\text{g}$ pro kg Körpergewicht) wäre der ab Juli im Jahr 2019 in der Oststadt gesammelte Pollen nicht zum Verzehr geeignet gewesen [26]. Vor dem Verzehr größerer Mengen von gesammeltem Pollen oder bei Verkaufsvorhaben sollte dies im Vorfeld abgeklärt werden.

KLIMAWANDEL, BIENEN UND STADTBÄUME

Bäume stellen einen Großteil des Nahrungsangebotes der Bestäuberinsekten im urbanen Bereich zur Verfügung. 150.000 der Bäume der Stadt sind vom Gartenbauamt erfasst, hinzu kommen 6.000 Streuobstbäume des Liegenschaftsamtes. Diese kartierten Pflanzen wurden nachfolgend untersucht. Die Abbildung zeigt einige der laut Kartierung häufigsten Trachtpflanzen in Karlsruhe. Die Blühzeiträume [20] sind angegeben, um aufzuzeigen in welchen Monaten sie den Bestäubern Nahrung anbieten. Die Angaben zum Nektar- und Pollenindex, der die Bedeutung für Bestäuber angibt, stammen von der Bayerischen Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau [21]. Die Trockentoleranz basiert auf den Angaben des Bundes deutscher Baumschulen e.V. [22]. Wie der Grafik entnommen werden kann, könnten durch zunehmende Trockenheit im Rahmen des Klimawandels die Bestände einiger der wichtigsten Stadt- und Obstbäume gefährdet werden. Zudem zeigt sich, dass ein Großteil der Stadtbäume im Frühjahr blüht und ab Juni kaum noch Tracht anbieten. Am stärksten bedroht sind die über 2.500 Berg-Ahornbäume aber auch für Apfel- und Birnbäume und Winter-Linden ist die Trockenheit problematisch. Die Investition in die Pflege und Bewässerung der Stadtbäume trägt damit direkt zur Förderung der Bestäuberinsekten bei.

Übersicht über die häufigsten Trachtbäume der Stadt Karlsruhe, ihren Bedeutung für die Bienen, ihre Blütezeiträume und ihre Trockenheitstoleranz. [20], [21], [22].



N = Nektarindex (0 = kein Nektar, 4 = maximaler Nektarwert)
 P = Pollenindex (0 = kein Pollen, 4 = maximaler Pollenwert)



ERGEBNISSE DES MONITORING

Auf den folgenden Seiten werden die im Jahr 2019 und 2020 mithilfe der Monitoringsysteme aufgezeichneten Daten vorgestellt und Hypothesen zu ihrer Interpretation aufgestellt. Die Auswertung der Videoaufnahmen an drei Standorten im Jahr 2020, wird aufgrund der hohen Kosten der Datenauswertung mittels Cloudressourcen erst im Rahmen künftiger Forschungsprojekte möglich sein.

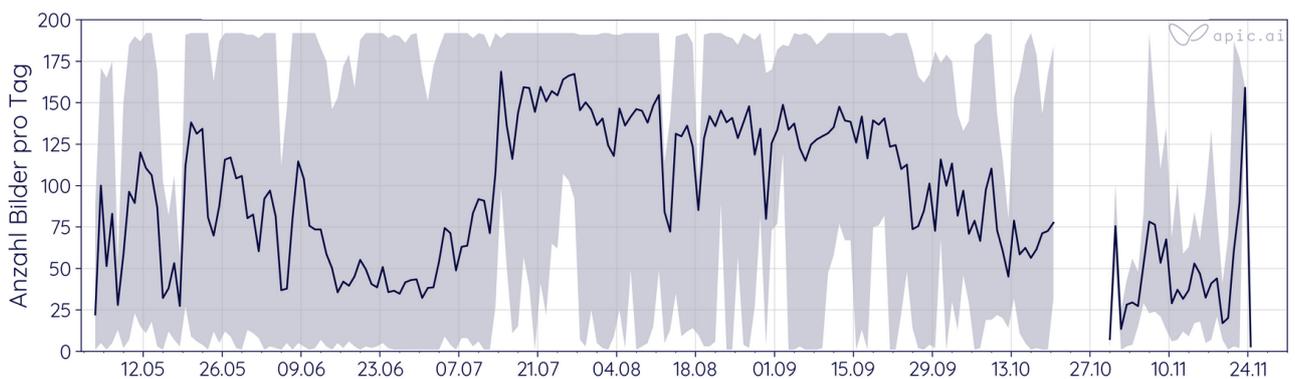
DATENBASIS

Insgesamt wurde in den Jahren 2019 und 2020 eine halbe Million Bilder gesammelt. Für die Auswertung wurden diese gefiltert. Die Daten einzelner Völker gingen nur in die Betrachtung mit ein, wenn pro Tag zwischen Sonnenaufgang und Sonnenuntergang deutscher Zeit mindestens 28 Bilder gesendet wurden. So soll eine Verfälschung der Aussagekraft vermieden werden. Wenn z.B. ein System nur ein einziges Bild pro Tag sendet und auf diesem gerade viel oder kein Pollen zu sehen ist, so ist dies eher dem Zufall geschuldet und lässt keine Aussage über den tatsächlichen Polleneintrag zu. Weiterhin wurden die Nachtwerte ausgeschlossen, da zu diesen Zeiten tendenziell kein Pollen eingetragen wird und bezogen auf die Aktivität eher nur Bienen zu sehen sind, die im Kamerabild ruhen. In den Auswertungen einzelner Naturräume werden zudem, sofern nicht anders angegeben, nur dann Interpretationen vorgenommen, wenn parallel von mindestens zwei Völkern Daten vorhanden sind, die den vorgenannten Kriterien entsprechen. So soll verhindert werden, dass von ungewöhnlichen Verhaltensweisen einzelner Völker auf ein gesamtes Gebiet geschlossen wird.

TÄGLICH ERFASSTE BILDER IM JAHRESVERLAUF VON 2019



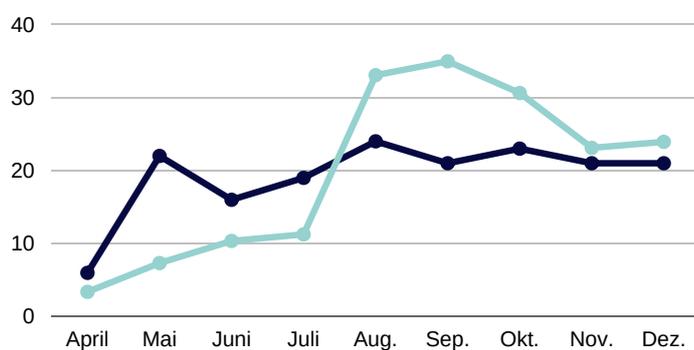
TÄGLICH ERFASSTE BILDER IM JAHRESVERLAUF VON 2020



2019

2019 sendeten die Monitoringsysteme im Abstand von 15 Minuten Bilder aus ihrem Kamerasichtfeld am Eingang der Bienenstöcke. Diese Frequenz wurde aufgrund der verfügbaren Mobilfunkbandbreite gewählt. Verwertbare Daten konnten an zwölf von 16 Standorten mit jeweils ein bis zwei Systemen gesammelt werden. Die Güte der Daten variierte an den einzelnen Standorten teils stark, was unter anderem mit der schlechten Netzabdeckung zusammenhing. Dies zeigt sich in der Breite des schattierten Bereichs in den Grafiken der vorherigen Seite, welche die Minima und Maxima aller Stöcke veranschaulicht.

Mit den Monitoringsystemen erfasste Bilder im Jahr 2019



Anzahl Systeme in Betrieb

Ausgewertete Bilder pro Monat in 1.000

2019 INSGESAMT

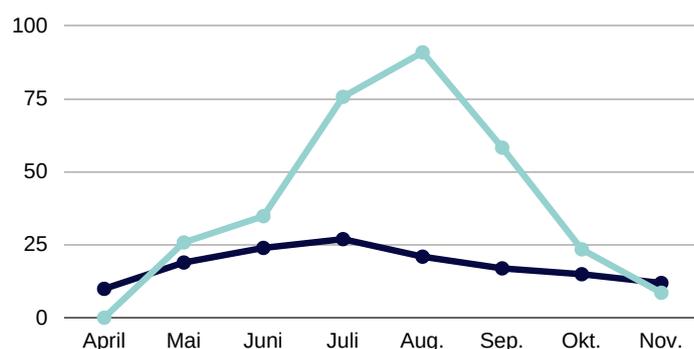
178.016

GESAMMELTE BILDER

2020

2020 sendeten die Monitoringsysteme im Abstand von 5 Minuten Bilder aus ihrem Kamerasichtfeld am Eingang der Bienenstöcke. Diese gesteigerte Frequenz wurde durch ein Hardware-Upgrade und neue Mobilfunkverträge möglich. Verwertbare Daten konnten in diesem Jahr an allen zwölf Standorten erhoben werden. Die Güte der Daten an den einzelnen Standorten variierte erneut stark. Für weiterführende Untersuchungen wurde zudem an je einem Standort der Karlsruher Naturräume Videomaterial aufgezeichnet. Dieses wird jedoch aus Kostengründen erst im Rahmen zukünftiger Forschungsprojekte ausgewertet werden.

Mit den Monitoringsystemen erfasste Bilder im Jahr 2020



Anzahl Systeme in Betrieb

Ausgewertete Bilder pro Monat in 1.000

2020 INSGESAMT

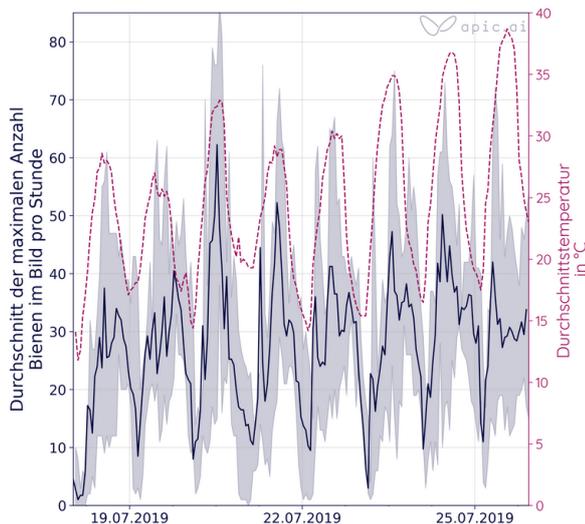
317.798

GESAMMELTE BILDER

Grundlegende MUSTER

In den Daten zur Bienenaktivität sind einige deutliche, teils wiederkehrende Muster erkennbar. Diese werden hier kurz vorgestellt und unter Zuhilfenahme verschiedener Quellen und wissenschaftlicher Veröffentlichungen erläutert. Die Funktionalität der neu entwickelten Methode von apic.ai wird hiermit bestätigt.

Vergleich von Aktivität und mittlerer Wochentemperatur im gesamten Stadtgebiet in einem Beispielzeitraum. Wetterdaten: DWD.



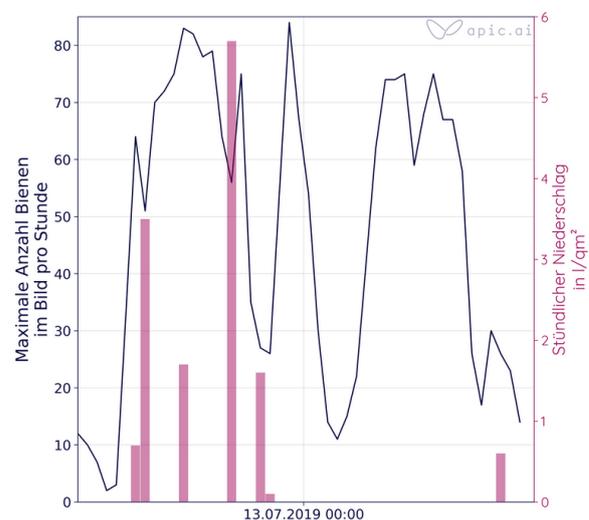
2. Während und im Anschluss an Regenfälle sind deutliche Einbrüche bei der Aktivität der Bienen zu beobachten. Diese werden auf Seite 33 näher betrachtet.

Um sich vor den Regentropfen zu schützen, bleiben die Bienen im Stock oder suchen sich draußen einen Unterschlupf bis der Regen vorbei ist [28].

1. In den Aktivitätsdaten ist deutlich der Tag-Nacht-Rhythmus der Honigbienen zu erkennen. Am Tag sind sie sehr viel aktiver als Nachts. Hier sitzen die Bienen oft für Stunden unbewegt im Bild.

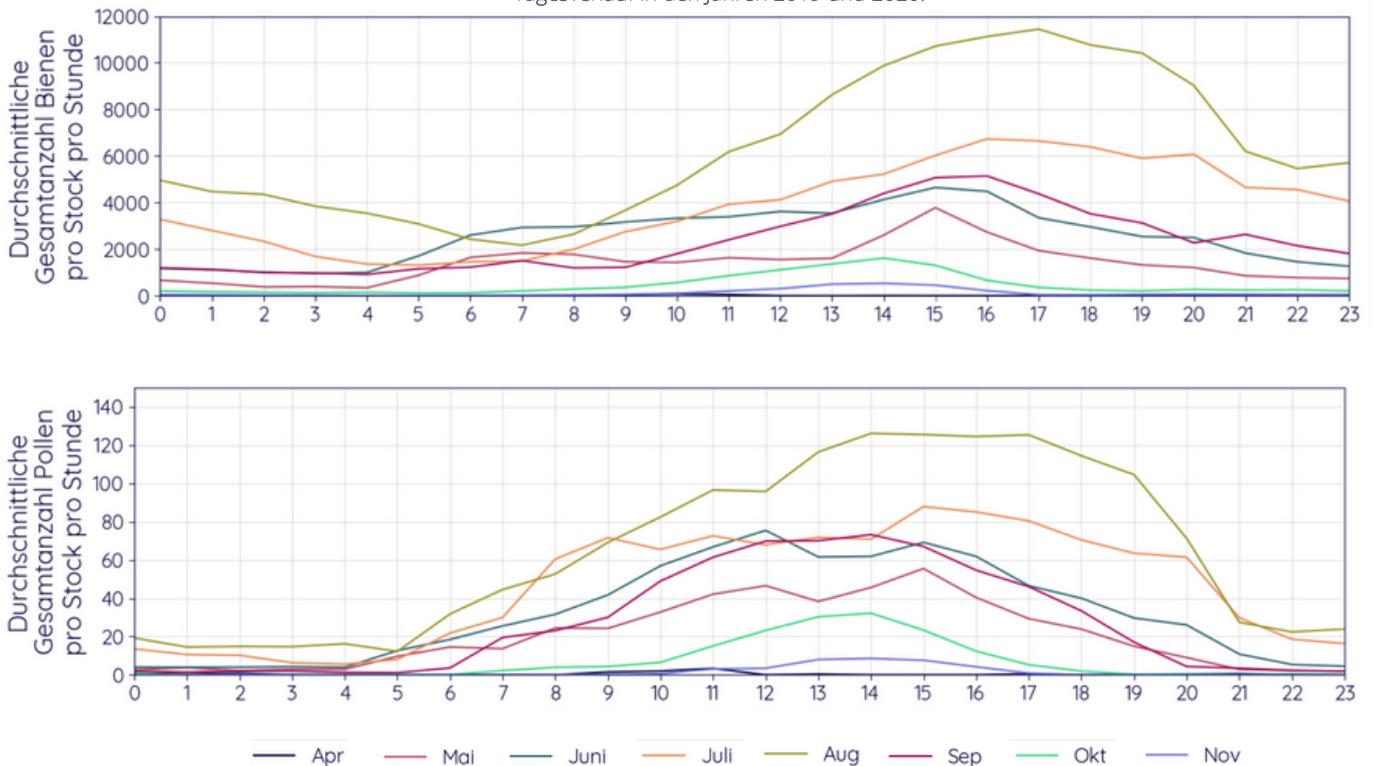
Die Aktivität korreliert mit der Tagestemperatur bzw. den Sonnenstunden und der Futterverfügbarkeit. Die Futterpflanzen der Bienen bieten den Bestäubern in der Regel nur tagsüber Nektar und Pollen [27].

Aktivitätsverlauf an Regentagen am Beispiel eines Volkes in der Siemensallee am 12.07 und 13.07 2019. Wetterdaten: DWD.



3. Das Verhalten der Bienen ist an die Natur angepasst, also an den Bestäubungsbedarf der Pflanzen und die damit verbundene Verfügbarkeit von Nektar und Pollen [29]. Es ist deutlich ein Tagesverlauf und ein Jahresverlauf erkennbar. In den kälteren Monaten ist die Aktivität geringer und es wird sehr viel weniger Pollen eingetragen.

Vergleich der Aktivität (oben) und des Polleneintrags (unten) der Bienenvölker im gesamten Stadtgebiet im Tagesverlauf in den Jahren 2019 und 2020.



4. In Daten von unterschiedlich warmen Nächten wird sichtbar, dass die Bienen im Stockeingang in heißen Nächten deutlich aktiver sind als in kühlen. Das ist auffällig, da Bienen nachts normalerweise nicht mehr auf Sammelflügen unterwegs sind [30]. In besonders heißen Nächten ist die Aktivität höher, da Bienen aus dem Stock gehen, um diesen kühler zu halten und sich im Eingangsbereich aufhalten, um frische Luft in den Stock zu fächeln [31].

Bild einer heißen Nacht am 21.07.2019. Die Durchschnittstemperatur zwischen 0 und sechs Uhr lag bei 19,7°C.



Bild einer kühlen Nacht am 21.09.2019. Die Durchschnittstemperatur zwischen 0 und sechs Uhr lag bei 9,6°C.

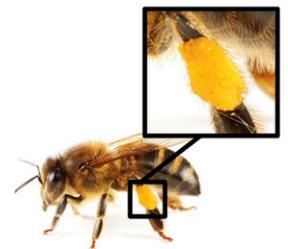


Einflussfaktoren des POLLENANGEBOTS

Bienen und andere Bestäuber sammeln als Energienahrung den Nektar von Pflanzen. Für die Aufzucht der Larven und Jungtiere wird überdies Pollen benötigt. Dieser wird in Form von Blütenstaub gesammelt und im Flug zu kleinen Päckchen - den Pollenhöschen - komprimiert. Sie sind etwas größer als Stecknadelköpfe und werden an den Beinen in den Stock getragen (siehe Bild). Eine Vielzahl von Faktoren können über den Anteil von Pollen-Sammelbienen entscheiden. In diesem Kapitel wird ein Versuch unternommen, Zusammenhänge zwischen einigen dieser Faktoren zu erkennen. Es handelt sich dabei lediglich um Beobachtungen aufgrund der vorliegenden Daten, die noch um Domänenwissen ergänzt werden sollten.

Der Einfluss folgender Faktoren auf die Polleneffizienz wurde untersucht:

- Bodenfeuchte
- Atmosphärisches CO₂
- Wetter



Im weiteren Verlauf dieses Kapitels werden die Faktoren zunächst einzeln betrachtet. Anschließend werden mittels der t-SNE Methode Wirkzusammenhänge untersucht. Ziel ist es, zu erkennen, ob die Faktoren temporäre Engpässe des Futterangebotes an Pollen verursacht haben könnten. Solche sog. Trachtlücken können insbesondere für Wildbienen problematisch sein, die kaum Vorräte anlegen, deren Volksentwicklung jedoch ebenfalls von der Nektar- und Pollenverfügbarkeit abhängt [37]. Als Indikator für die Verfügbarkeit von Pollen wird die Polleneffizienz genutzt. Sie bezeichnet den Anteil der Bienen, die mit Pollen von einem Ausflug zurückkehren. Bei ähnlichen Umgebungsbedingungen ist sie ein guter Indikator für den Vergleich des Sammelverhaltens verschiedener Völker. Ein Abfall der Polleneffizienz um 20% bedeutet folglich, dass bei gleicher Aktivität 20% weniger Pollen in einen Stock eingetragen wurde. Da es sich um einen relativen Wert handelt, können unterschiedlich starke Völker verglichen werden.

Bodenfeuchte

Forschungsarbeiten zeigen, dass die Produktion von Pollen und Nektar durch Pflanzen wie Scarlet Gilia [32] und Ambrosia [33] empfindlich gegenüber Temperatur und Wasserverfügbarkeit ist und mit sinkender Bodenfeuchte zurückgeht [32]. Zur Messung der Trockenheit wird zum Zweck der folgenden Untersuchungen das vom Zentrum für Agrarmeteorologische Forschung Braunschweig entwickelte *Agrarmeteorologische Modell zur Berechnung der aktuellen Verdunstung* verwendet. Die Menge des Wassers, das den Pflanzen zur Verfügung steht, wird in % nutzbarer Feldkapazität (nFK) angegeben. Im Folgenden werden Daten aus Bodenfeuchtemessungen in 25cm Tiefe verwendet [35]. Durch das Modell können für einzelne Standorte nFK Werte simuliert werden.

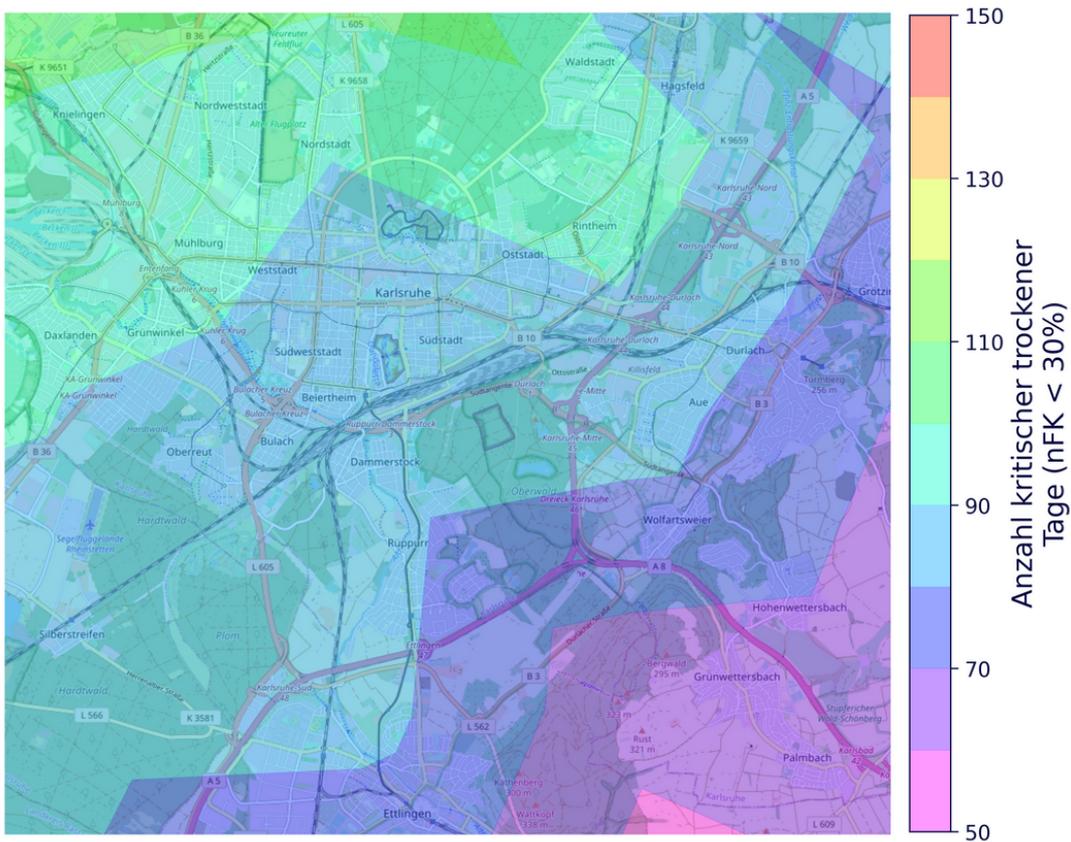
In dem Modell gilt ein nFK Wert unter 30 als kritisch, da aufgrund von Trockenstress der Pflanzen mit Ertragseinbußen zu rechnen ist. [36]

Klassen der Bodenfeuchte in Prozent nutzbarer Feldkapazität. Quelle: DWD [30]

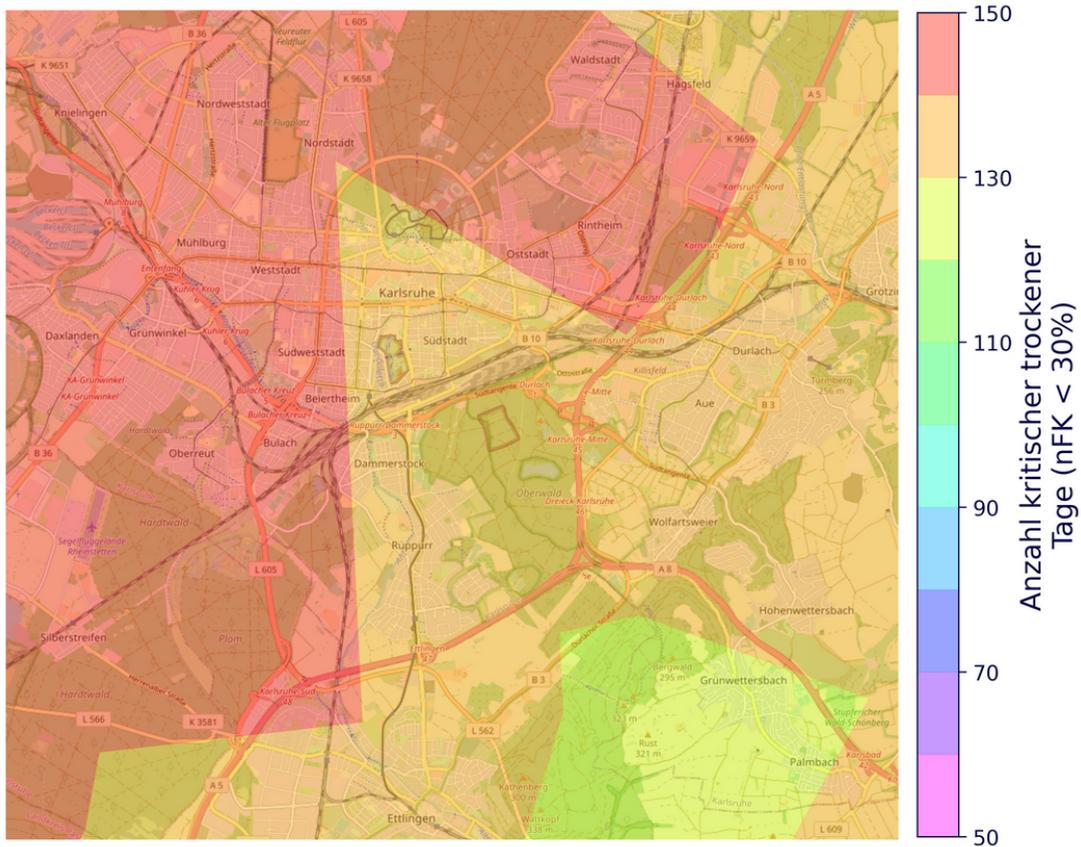
% nFK	Pflanzenentwicklung
< 30	Die Pflanze steht unter Trockenstress, mit Ertragseinbußen ist zu rechnen
30 - 50	Noch ausreichende Wasserversorgung der Pflanzen
50 - 80	Optimales Wasserangebot

In den beiden untersuchten Jahren 2019 und 2020 zeigte sich für letzteres eine deutlich geringere Wasserverfügbarkeit in 25 cm Bodentiefe. Je nach Stadtgebiet lagen 2019 zwischen 60 und 110 Tage mit einem nFK < 30 vor. Im Jahr 2020 waren es zwischen 110 und 150 Tage (siehe nächste Seite). Die Nektarverfügbarkeit fiel jedoch, wie auf Seite 19 dargestellt, im Jahr 2020 signifikant höher aus als im weniger trockenen Jahr 2019. Im Frühjahr wurde hier viermal Mal mehr Honig gemeldet, im Sommer die doppelte Menge. Eine schlechte Wasserverfügbarkeit scheint folglich nicht zwangsläufig zu einer Verringerung des Nahrungsangebots für Bienen zu führen.

Anzahl Tage mit kritischer Trockenheit nFK > 30 % im Jahr 2019.
Datenquelle: UFZ-Dürremonitor/Deutscher Wetterdienst.



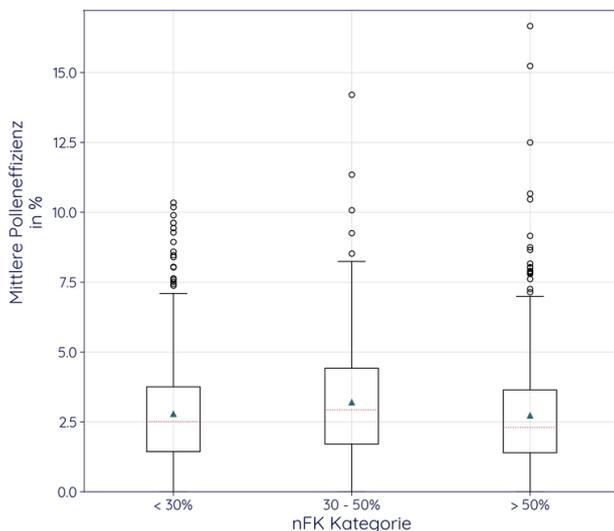
Anzahl Tage mit kritischer Trockenheit nFK > 30 % im Jahr 2020
 Datenquelle: UFZ-Dürremonitor/Deutscher Wetterdienst.



Um einen möglichen Einfluss auf die Pollenproduktion der Pflanzen und damit auch auf die Nahrungsverfügbarkeit der Karlsruher Bestäuber zu messen, werden die beiden Jahre miteinander verglichen. Mithilfe von Boxplots wurde der Zusammenhang zwischen nFK und Polleneffizienz untersucht, um zu erkennen, ob der Anteil der Pollensammlerinnen bei Trockenheit zurückging. Da die Sammelaktivität auch durch geringe Temperaturen zurückgeht, wurden nur Tage im Zeitraum von Anfang Mai bis Ende Oktober berücksichtigt. Ein negativer Einfluss von Trockenheit auf die Polleneffizienz ist nicht erkennbar.

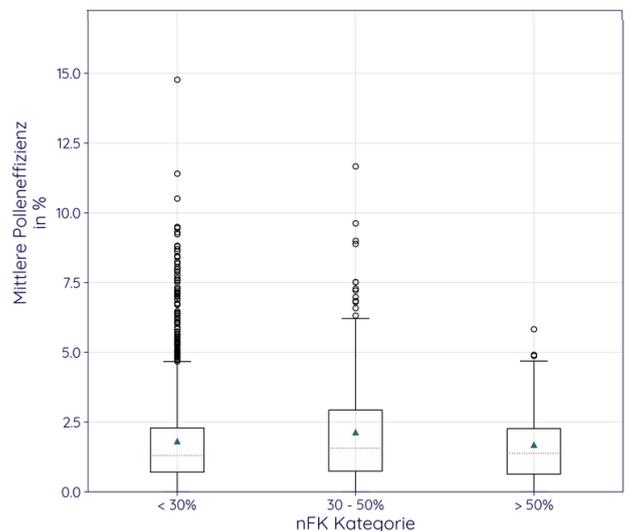
2019

Polleneffizienz bei unterschiedlicher Bodenfeuchte zwischen Anfang Mai und Ende Oktober 2019.



2020

Polleneffizienz bei unterschiedlicher Bodenfeuchte zwischen Anfang Mai und Ende Oktober 2020.



Vergleicht man die Polleneffizienz beider Jahre, zeigt sich, dass der Wert im Jahr 2020 insgesamt auf einem niedrigeren Niveau lag. Ob dies tatsächlich auf ein geringeres Angebot zurückzuführen ist, lässt sich allein anhand der vorliegenden Daten nicht beurteilen. Die genauere Untersuchung des Zusammenhangs erfordert die Erhebung von Langzeitwerten. Zudem müssen auch Daten über das pflanzenverfügbare Wasser in tieferliegenden Bodenschichten betrachtet werden. Bislang existieren folgende Hypothesen:

1. Der geringere Anteil der Pollensammlerinnen könnte auf einen höheren Anteil von Nektarsammlerinnen zurückzuführen sein. Wie auf Seite 19 dargestellt, war das Nektarangebot im Jahr 2020 deutlich höher als im Vorjahr. Darüber, inwieweit Nektar- und Pollenangebot miteinander korrelieren liegen jedoch kaum Informationen vor. Bei den Konkurrenzstrategien verschiedener Pflanzen liegen Unterschiede vor. Jene die nur 1-2 Jahre leben investieren relativ viel Energie in die Fortpflanzung und setzen deshalb auf maximale Samenproduktion. Mehrjährige Pflanzen wie die Stadtbäume streben eher ein möglichst langes Leben an und stecken verhältnismäßig weniger Energie in die Samenproduktion. Fühlen sie sich in ihrer Existenz bedroht, können jedoch auch sie die Produktion von Pollen erhöhen und mehr Energie in die Reproduktion investieren [38].
2. Für ein geringeres Pollenangebot im Jahr 2020 spricht, dass der April des Jahres in Karlsruhe der trockenste seit 1950 war. Die Niederschlagsmenge im Vorjahr entsprach dem Durchschnitt der letzten Jahrzehnte [39]. Die Trockenheit 2020 könnte zu einer niedrigeren Pollenproduktion geführt haben, denn die Anzahl der Pollen-Mutterzellen entscheidet sich früh im Entwicklungsprozess der Pflanzen. Abhängig von der Menge dieser Zellen gibt es ein höheres oder geringeres Maximum der Anzahl von Pollen, die eine Pflanze bei optimaler Wasserversorgung hervorbringen kann. Bis dieses Optimum erreicht wird steigt die Pollenproduktion der einzelnen Zellen der Pflanze mit der vorhandenen Feuchtigkeit. [32] Trockenheit während des Frühjahrs kann zudem zu einer Deformation der männlichen Blüten und so zu einer negativen Beeinflussung der Pollenbildung führen [40].

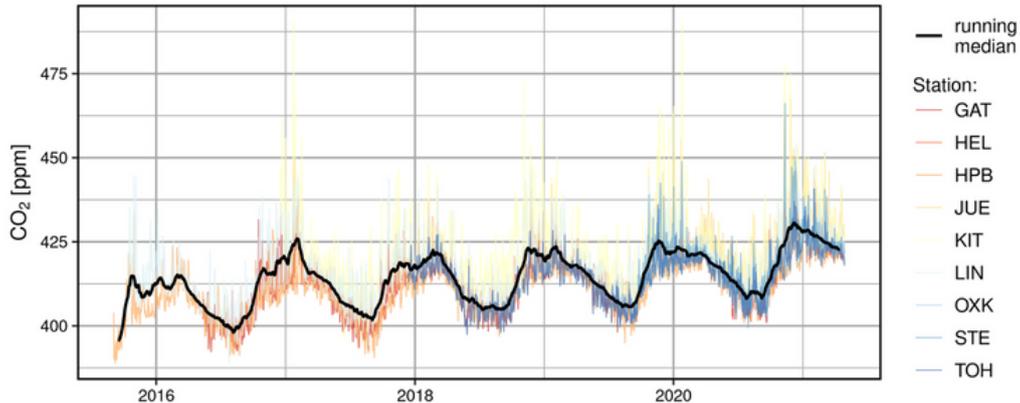
Mögliche Unterschiede beim Einfluss der Bodenfeuchte in 25 cm Tiefe auf die Polleneffizienz werden im Kapitel "Detailbetrachtungen nach Ort" basierend auf den Ergebnissen der Bildauswertung von apic.ai vorgenommen. Da im Zuge des Klimawandels mit zunehmender Trockenheit zu rechnen ist, könnte vermehrte Trockenheit, insbesondere im Frühjahr, ein Problem für die Nahrungssicherheit der Bestäuberinsekten in der Region Karlsruhe darstellen. Dabei sind neben den unterschiedlichen Pflanzenstrategien auch andere interaktive Effekte zu berücksichtigen, wie der folgende Abschnitt zeigt.

Atmosphärisches CO₂

Wie bereits beschrieben, führt Trockenstress bei manchen Pflanzen zu einer Verringerung der Pollenproduktion. Eine erhöhte CO₂-Konzentration kann jedoch zu einer Erhöhung der Pollenproduktion führen. Da beide Effekte im Rahmen des Klimawandels gemeinsam auftreten, kann es sein, dass sie nur bedingt sichtbar werden [32].

Da jedoch zwischen den beiden betrachteten Jahren kein hoher Unterschied bezüglich des CO₂ Gehalts der Luft bestand, wird der Effekt bei dieser Analyse nicht weiter beachtet. Seine potenzielle Langzeitwirkung sollte jedoch nicht unterschätzt werden, denn die CO₂-Konzentration der Luft in Karlsruhe ist seit 2016, wie in der folgenden Abbildung dargestellt, gestiegen [34].

Atmosphärische Treibhausgas Konzentration in Karlsruhe (tägliche Mittelwerte) [25].



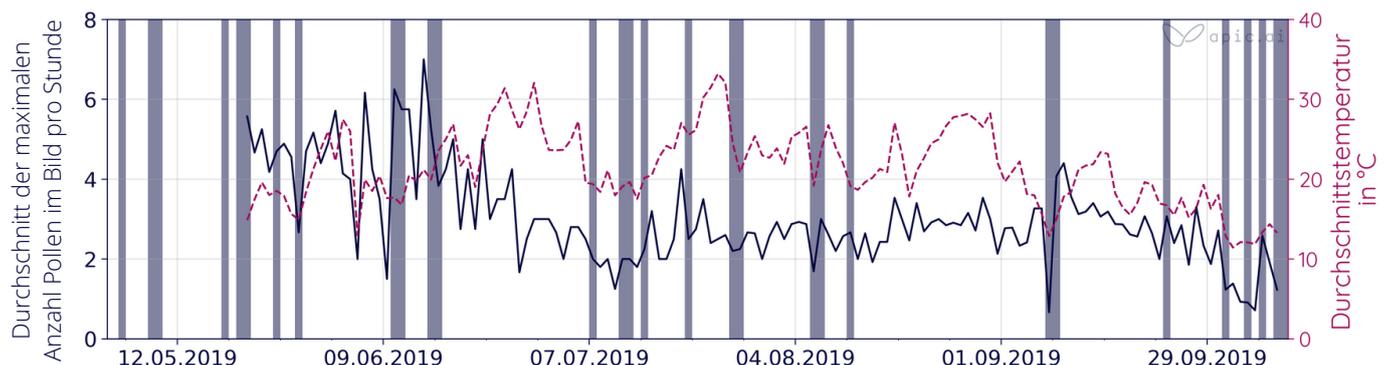
Wetter

Dass das Wetter einen Einfluss auf das Nektarangebot der Bäume hat, wurde bereits auf Seite 19 dargestellt. Ob es auch einen Einfluss auf das Pollenangebot hat wurde auf Basis der Daten aus der Bildauswertung untersucht. Als relevante Parameter einbezogen wurden Temperatur, Niederschlag, Wind und Luftfeuchtigkeit. Da davon auszugehen ist, dass Wind und Luftfeuchtigkeit allein auf Tagesebene keine starken Effekte haben, sondern eher bestehende Tendenzen verstärken, werden sie erst auf Seite 34 in Kombination mit anderen Faktoren näher betrachtet.

Als Indikator für das Pollenangebot bzw. das Pollen-Sammelverhalten wurden tägliche Mittelwerte der stündlichen Maxima von Pollen im Bild der einzelnen Standorte betrachtet. Dieser Parameter wird durch die Anzahl der Bienen, die sich gerade bei hohen Temperaturen häufig nur zur Stockbelüftung im Kamerabild aufhalten nicht beeinflusst. In den folgenden Grafiken wird der tägliche Durchschnitt dieses Maximums und die mittlere Tagestemperatur beider Jahre visualisiert. Als blaue Balken zu erkennen sind Tage mit Niederschlägen von mehr als 4 l/m².

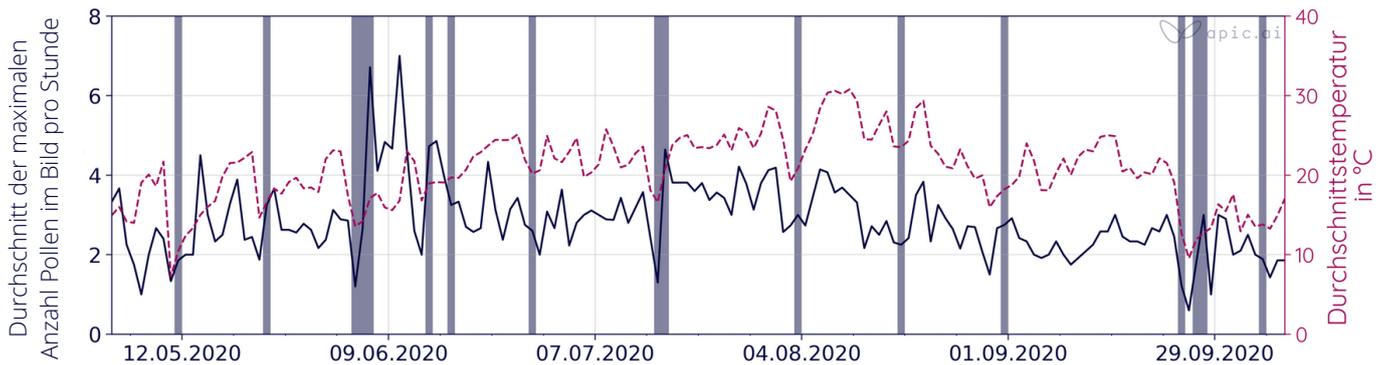
Die höchsten Pollenwerte im Jahr 2019 wurden bis Ende Juni gemessen. Während der Sommermonate sind die Werte etwas geringer. Ab Ende Juni scheint der Polleneintrag grob dem Temperaturverlauf zu folgen. Im niederschlagsarmen Zeitraum zwischen dem 20. Juni und dem 19. Juli, geht der Polleneintrag zurück, nach einigen Niederschläge steigt er wieder an.

Täglicher Durchschnitt der maximalen Anzahl Pollen im Bild pro Stunde im Zusammenhang mit der durchschnittlichen Tagestemperatur und Tagen mit Niederschlägen über 4 l/m² im Jahr 2019.



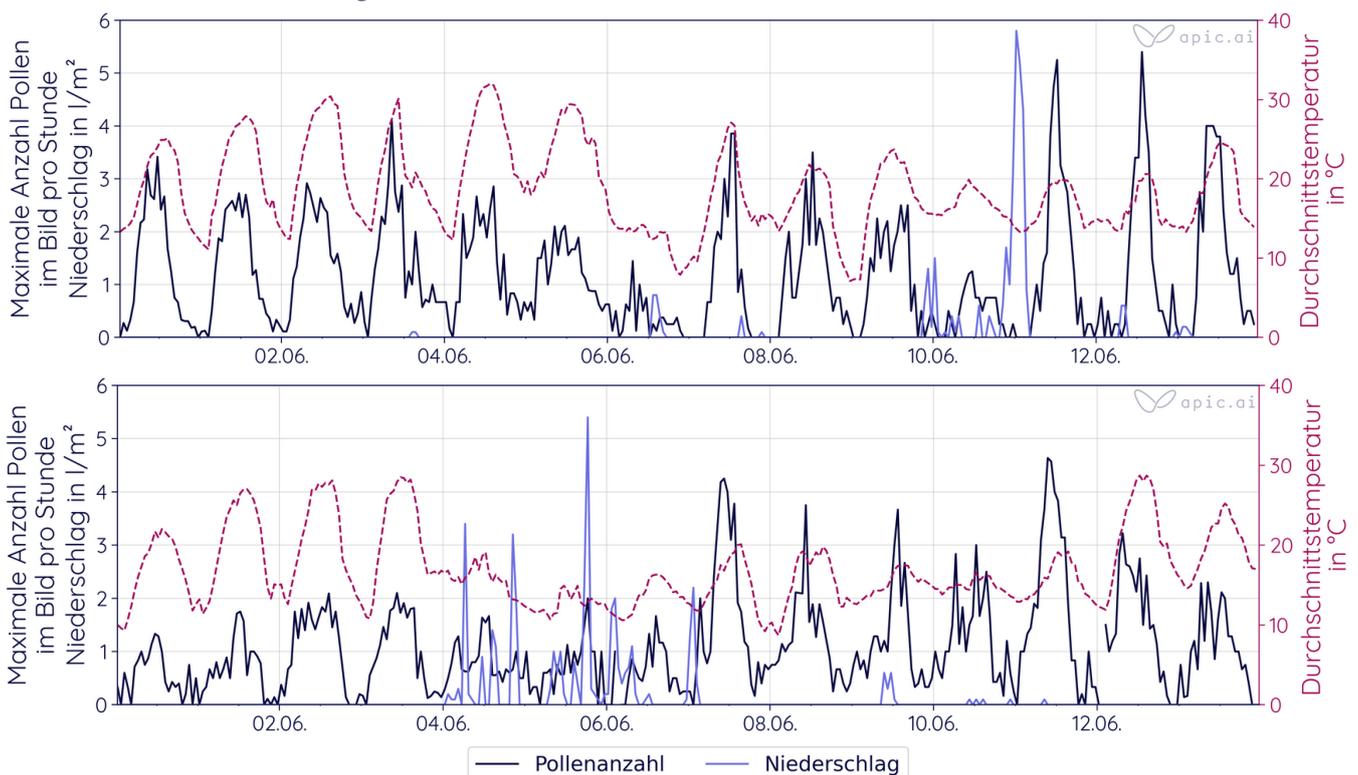
Im Jahr 2020 war das Kamerabild der Monitoringsysteme fast doppelt so groß wie im Jahr 2019. Dass dennoch weniger Pollen erfasst wurden, legt nahe, dass der absolute Polleneintrag deutlich geringer war. Ein erhöhter Polleneintrag im Frühjahr lässt sich während des trockenen Frühjahrs nicht erkennen. Die Ausschläge im Mai nach vermehrten Niederschlägen deuten hierfür einen Zusammenhang mit der Trockenheit an. Die Pflanzen scheinen mit einer Erhöhung des Pollenangebotes auf den Regen zu reagieren. Ab Ende Juni folgt der Polleneintrag in diesem Jahr grob dem Temperaturverlauf.

Täglicher Durchschnitt der maximalen Anzahl Pollen im Bild pro Stunde im Zusammenhang mit der durchschnittlichen Tagestemperatur und Tagen mit Niederschlägen über 4 l/m² im Jahr 2020.



Ein besseres Verständnis für die Wirkzusammenhänge verschafft die Betrachtung der täglichen Werte im Zeitraum vom 31. Mai - 13. Juni beider Jahre. Hier zeigt sich, dass der Polleintrag bei hohen Temperaturen tendenziell geringer ist. An den mit Temperaturrückgängen verbundenen Regentagen selbst geht der Polleneintrag zurück. An den Tagen, die auf hohe Niederschläge folgen, scheint der Polleneintrag jedoch zu steigen. Eine weitere Beobachtung ist, dass die Pollen-Sammelaktivität an sehr heißen Tagen über den gesamten Tag konstant ist, während sie an weniger heißen Tagen Spitzen aufweist.

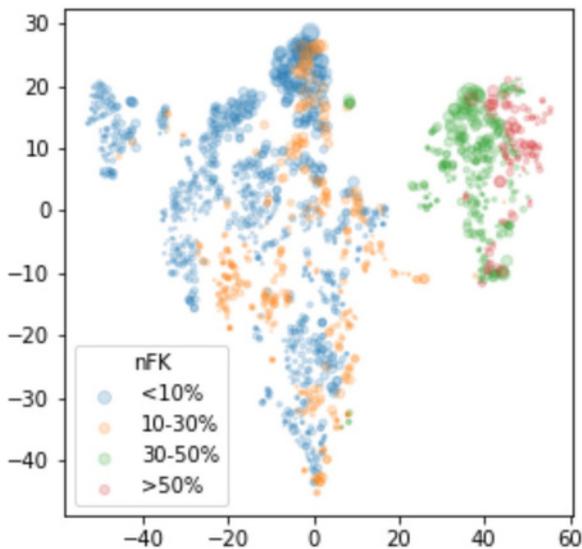
Maximale Anzahl Pollen im Bild pro Stunde im Zusammenhang mit der stündlichen Temperatur und den stündlichen Niederschlägen vom 31.05. - 13.06.2019 (oben) und vom 31.05. - 13.06.2020 (unten).



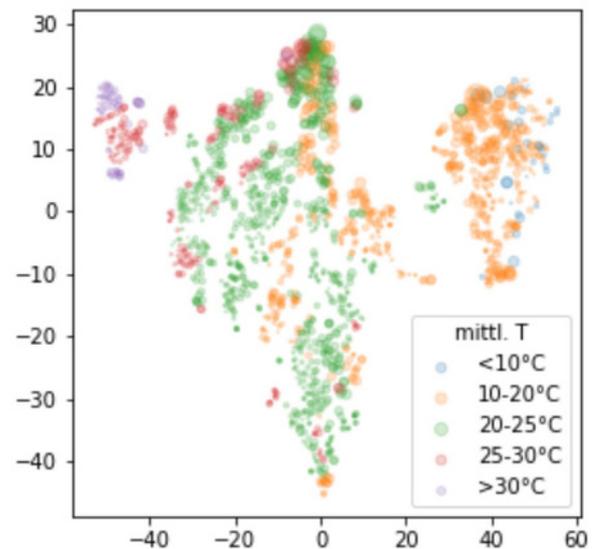
Wirkzusammenhänge der Faktoren

Da die verschiedenen vorgenannten Beobachtungsgrößen zueinander in Abhängigkeit stehen, ist es hilfreich multivariate Verfahren für die Analyse von Zusammenhängen zu nutzen. Um generelle und wechselseitige Beziehung mit der Polleneffizienz sichtbar zu machen, wurde die t-SNE Methode genutzt. Sie ermöglicht es, mehrdimensionale Datensätze zweidimensional darzustellen und Cluster bei der Projektion zu erhalten. Jeder der bunten Punkte der folgenden Darstellungen stellt den Wert der entsprechenden Messgröße an einen Tag im Auswertungszeitraum 2019 und 2020 dar. Je größer der Punkt, desto höher die Polleneffizienz. Die Achsen der Abbildung wie auch die Form der Cluster haben bei der Auswertungsmethode keine anschauliche Bedeutung. Die Grafiken auf Seite 35 zeigen, in welchen Clustern die höchste Polleneffizienz vorlag. In den folgenden vier Darstellungen lassen sich die Ausprägungen von Bodenfeuchte, mittlerer Temperatur, Windgeschwindigkeit und Luftfeuchtigkeit in den Clustern erkennen.

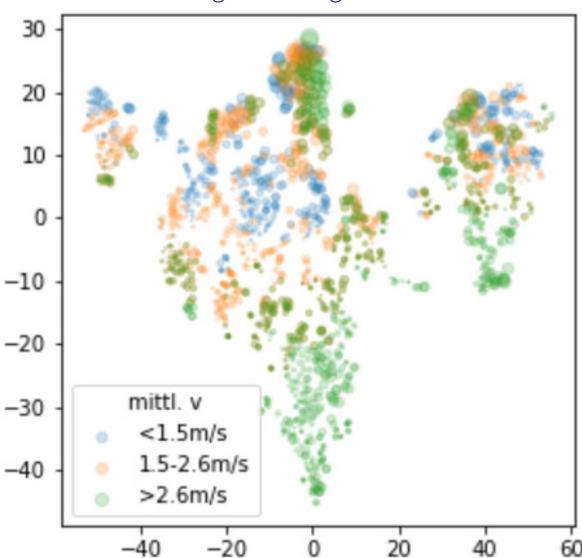
t-SNE Visualisierung mit Einfärbung der Bodenfeuchtbereiche.



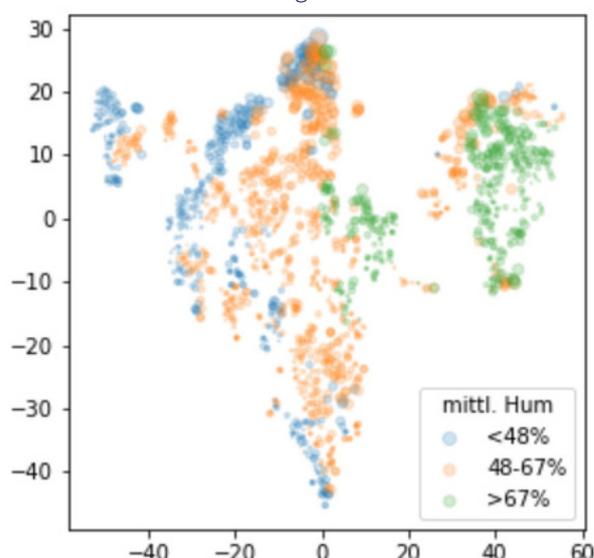
t-SNE Visualisierung mit Einfärbung der Temperaturbereiche.



t-SNE Visualisierung mit Einfärbung der Windgeschwindigkeitsbereiche.

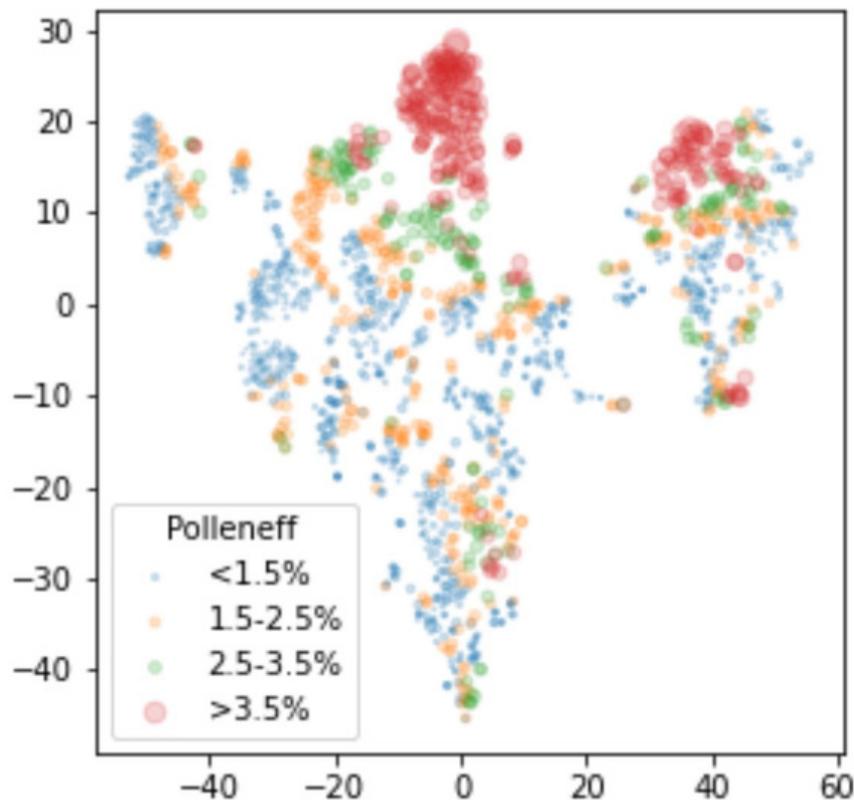


t-SNE Visualisierung mit Einfärbung der Luftfeuchtheitsbereiche.



Die folgende Darstellung zeigt das Ergebnis der t-SNE Analyse der Ausprägungen der vorgenannten Einflussfaktoren auf die Polleneffizienz.

t-SNE Visualisierung mit Einfärbung der Polleneffizienz kategorien



Die höchste Polleneffizienz von >3,5% liegt in den Clustern roter Punkte vor (linke Grafik). Wie den Analysen auf der vorherigen Seite zu entnehmen ist, tritt sie sowohl an Tagen mit einem nFK<30% auf, der für Pflanzen als kritisch gilt, als auch bei einem nFK von 30-50%. Dabei können Temperaturen zwischen 10°C und 30°C vorkommen. Auch hohe Windgeschwindigkeiten scheinen dabei keinen negativen Einfluss zu haben. Alle Luftfeuchtigkeits-Kategorien kommen in diesem Cluster vor.

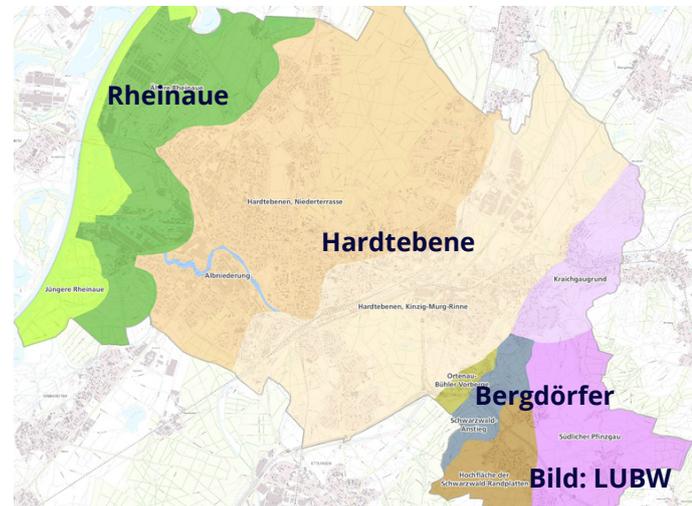
Eine etwas geringere Polleneffizienz von 2,5% - 3,5% liegt in den Clustern grüner Punkte vor. Sie tritt ebenfalls primär bei nFK Werten unter 50 % auf. Die Temperaturen sind dabei tendenziell etwas geringer und liegen zwischen 10°C und 25°C. Die Windstärke liegt dabei eher im mittleren bis unteren Bereich. Zusammenhänge mit der Luftfeuchtigkeit sind erneut auf der untersuchten Tagesebene nicht erkennbar. Besonders gering ist die Polleneffizienz an Tagen über 25°C mit geringer Bodenfeuchtigkeit und geringer bis mittlerer Luftfeuchtigkeit. An heißen Tage, denen eine lange niederschlagsarme Zeit vorangegangen ist, zeigt sich entsprechend ein geringerer Anteil von Pollensammlerinnen.

Die Analyse des quantitativen Polleneintrags mittels der maximalen stündlichen Anzahl von Pollen unterstützt diese Thesen. Die vielen grünen Punkte in der rechten Grafik liegen im gleichen Cluster wie die roten in der rechten, d.h. an den Tagen mit der höchsten Polleneffizienz war auch die Anzahl der eingetragenen Pollen am größten. Der geringste mengenmäßige Polleneintrag scheint im rechten Cluster vorzuliegen, das Temperaturen von 10-20 °C mit hoher Luftfeuchtigkeit und nFK Werten >30% verbindet.

Regionale Entwicklungen

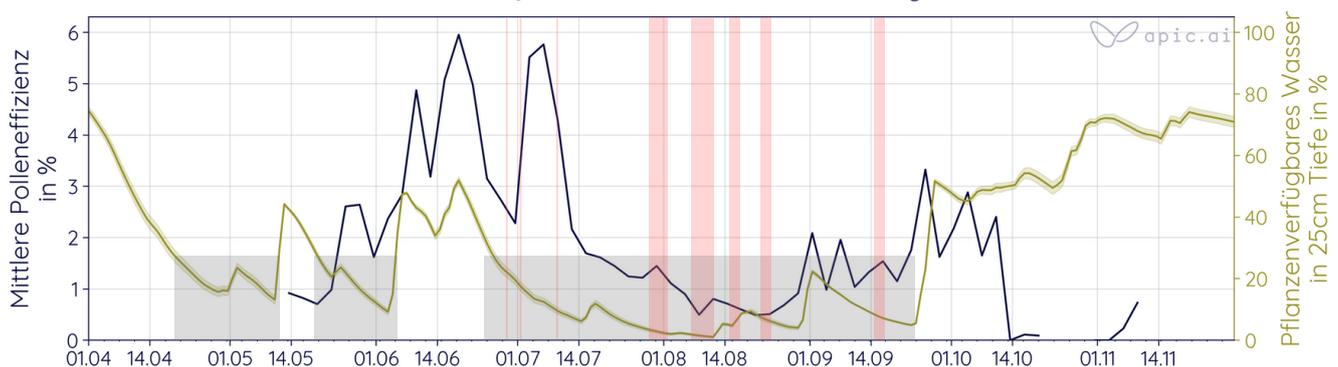
Zur Feststellung möglicher Trachtlücken einzelner Naturräume der Stadt wurden die Daten der Messstationen entsprechend ihrem Standort ausgewertet. Hierbei muss jedoch beachtet werden, dass die Bienen mobil sind und allgemein im Radius von 2-3 km um ihren Stock sammeln. Entsprechend kann es sein, dass sie die Grenzen der Naturräume bei ihren Sammelflügen übertreten. Die Angaben zur Polleneffizienz stellen jeweils den Mittelwert von drei Tagen dar, zum Zweck der besseren Lesbarkeit und zum Ausgleich von witterungsbedingten Schwankungen.

Dabei wird das pflanzenverfügbare Wasser entsprechend der Modellierung an jedem einzelnen Standort verwendet, von dem Daten genutzt wurden und jeweils ein Mittelwert gebildet. Das pflanzenverfügbare Wasser wird wie bereits beschrieben in 25 cm Tiefe dargestellt, tiefere Bodenschichten werden hier nicht betrachtet. Für alle Gebiete werden die gleichen Temperaturwerte verwendet. Sie stammen von einer Wetterstation in Rheinstetten nahe Karlsruhe.



Bergdörfer

Dreitägig gemittelte Polleneffizienz und pflanzenverfügbares Wasser in den Bergdörfern 2020. Rot schattiert sind Tage mit Temperaturmaximum über 30 °C in Karlsruhe, grau schattiert sind mehrwöchige niederschlagsarme Zeiträume mit nFK <30 %. Bis 13. Juli waren nur Daten von einem Volk verfügbar.



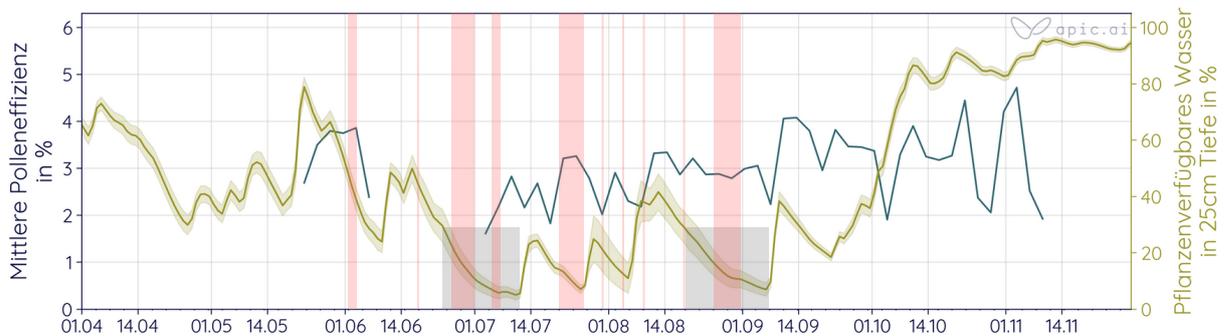
In den Bergdörfern gab es aufgrund der schlechten Internetverfügbarkeit die geringste Datenmenge aller Gebiete. Für 2019 konnten die Qualitätskriterien, die für die Interpretierbarkeit der Daten gesetzt wurden, nicht erfüllt werden. Aus dem Jahr 2020 sind bis zum 13. Juli nur die Daten von einem Volk nutzbar gewesen, erst danach wurden die zuvor beschriebenen Kriterien erfüllt. Bis zu diesem Datum sind die Werte deshalb nur eingeschränkt interpretierbar.

Auch unter dieser Einschränkung lässt die Betrachtung von pflanzenverfügbarem Wasser und Polleneffizienz einen Zusammenhang vermuten. Bei relativ guter Wasserverfügbarkeit im Juni lag die Polleneffizienz sehr hoch. Ab Mitte Juli, mit etwas Zeitversatz, sank die Polleneffizienz bei zurückgehender Bodenfeuchte deutlich. Während der Hitzeperiode im Juli sank sie auf bis zu 0,5%. Nachdem Anfang September wieder Niederschläge verzeichnet wurden, stieg sie deutlich an. Als der nFK Wert wieder über 30% stieg, lag die Polleneffizienz bis in den Oktober zwischen 2% und 3%.

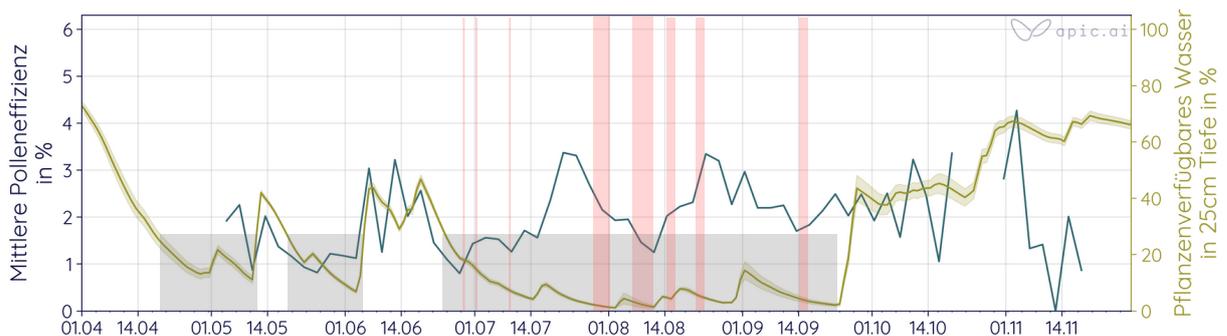
Die Auswertung von Videomaterial zweier Völker im Jahr 2020 in dem Naturraum steht noch aus.

Hardtebene

Dreitägig gemittelte Polleneffizienz und pflanzenverfügbares Wasser in der Hardtebene 2019. Rot schattiert sind Tage mit Temperaturmaximum über 30 °C in Karlsruhe, grau schattiert sind mehrwöchige niederschlagsarme Zeiträume mit nFK <30 %.



Dreitägig gemittelte Polleneffizienz und pflanzenverfügbares Wasser in der Hardtebene 2020. Rot schattiert sind Tage mit Temperaturmaximum über 30 °C in Karlsruhe, grau schattiert sind mehrwöchige niederschlagsarme Zeiträume mit nFK <30 %.

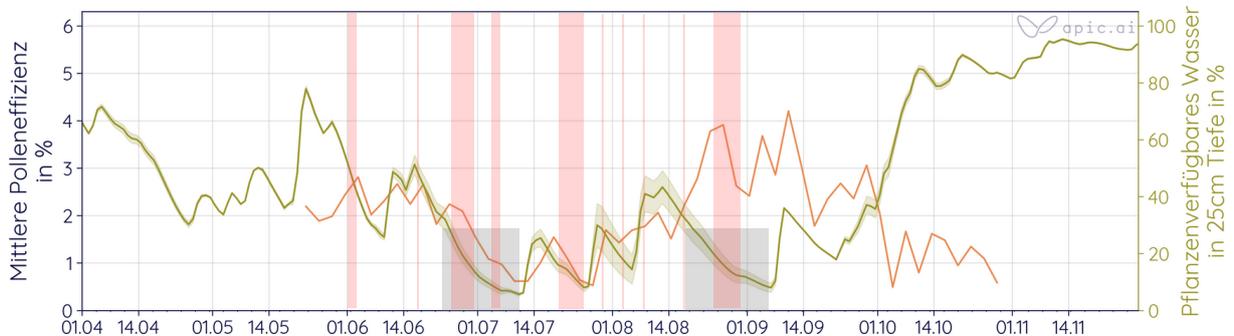


Die Polleneffizienzwerte in der Hardtebene unterscheiden sich in den Jahren 2019 und 2020 in ihrem Verlauf. 2019 lagen sie verhältnismäßig konstant zwischen 2% und 4%. Im darauffolgenden Jahr waren sie insgesamt niedriger, sanken temporär auf unter 1% und erreichten kaum Werte von 3%. Es traten deutlich mehr Schwankungen auf. Die Polleneffizienz schien in beiden Jahren nicht unmittelbar mit dem pflanzenverfügbaren Wasser zusammenzuhängen. 2019 schien der Anteil der Pollensammlerinnen zwar nach Regenfällen zu steigen, es zeigten sich jedoch auch in Phasen sehr geringen nFKs und großer Hitze keine Einbrüche. Im Mai 2020 lag die Polleneffizienz in Perioden mit kritischer Bodenfeuchte unter 1,5%. Nach vermehrten Regenfällen im Juni stieg sie deutlich an, mit rückläufiger Bodenfeuchte Ende Juni fiel sie wieder ab. Die Polleneffizienzwerte in der Hardtebene unterscheiden sich in den Jahren 2019 und 2020 in ihrem Verlauf. 2019 lagen sie verhältnismäßig konstant zwischen 2% und 4%. Im darauffolgenden Jahr

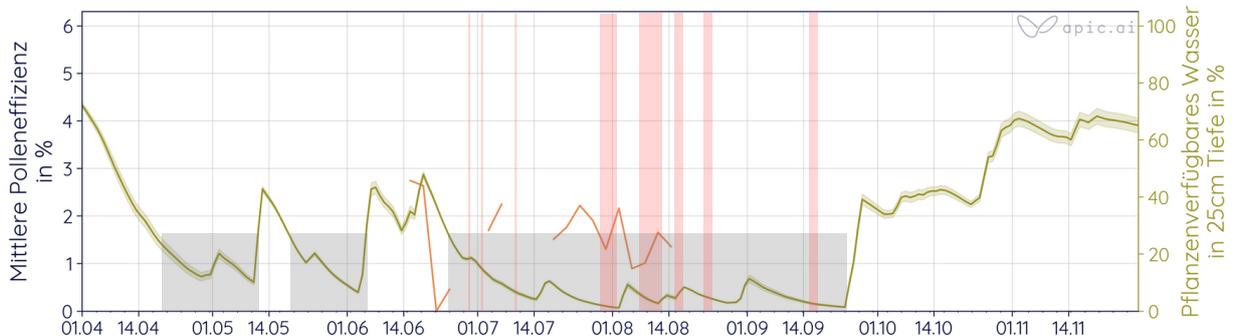
waren sie insgesamt niedriger, sanken temporär auf unter 1% und erreichten kaum Werte von 3%. Es traten deutlich mehr Schwankungen auf. Die Polleneffizienz schien in beiden Jahren nicht unmittelbar mit dem pflanzenverfügbaren Wasser zusammenzuhängen. 2019 schien der Anteil der Pollensammlerinnen zwar nach Regenfällen zu steigen, es zeigten sich jedoch auch in Phasen sehr geringen nFKs und großer Hitze keine Einbrüche. Im Mai 2020 lag die Polleneffizienz in Perioden mit kritischer Bodenfeuchte unter 1,5%. Nach vermehrten Regenfällen im Juni stieg sie deutlich an, mit rückläufiger Bodenfeuchte Ende Juni fiel sie wieder ab. Anders als zu erwarten gewesen wäre, gab es im Verlauf von Juli und August jedoch trotz konstant kritischer Bodenfeuchte zwei Zeiträume mit deutlich erhöhter Polleneffizienz. Diese beiden "Spitzen" trennt eine Phase großer Hitze mit Temperaturen über 30°C. Ende September tritt mit der Rückkehr der Bodenfeuchte aus dem kritischen Bereich heraus keine Veränderung der Polleneffizienz ein. Diese bleibt weiterhin auf einem Wert um 2%. Darüber, warum sich ab Juli 2020 Bodenfeuchte und Polleneffizienz nicht mehr zu beeinflussen scheinen, kann ohne weitere Daten nur gemutmaßt werden. Es könnte z.B. einen Zusammenhang mit der Bewässerung durch die Stadt und ihre Bürger geben. Darüber hinaus ist zu bedenken, dass hier lediglich das pflanzenverfügbare Wasser in 25 cm Bodentiefe betrachtet wird. Tiefere Bodenschichten könnten den Pflanzen, die mit ihrem Wurzelwerk Zugang zu ihnen haben, länger Wasser zur Verfügung stellen.

Rheinaue

Dreitägig gemittelte Polleneffizienz und pflanzenverfügbares Wasser in der Rheinaue 2019. Rot schattiert sind Tage mit Temperaturmaximum über 30 °C in Karlsruhe, grau schattiert sind mehrwöchige niederschlagsarme Zeiträume mit nFK <30 %.



Dreitägig gemittelte Polleneffizienz und pflanzenverfügbares Wasser in der Rheinaue 2020. Rot schattiert sind Tage mit Temperaturmaximum über 30 °C in Karlsruhe, grau schattiert sind mehrwöchige niederschlagsarme Zeiträume mit nFK <30 %.



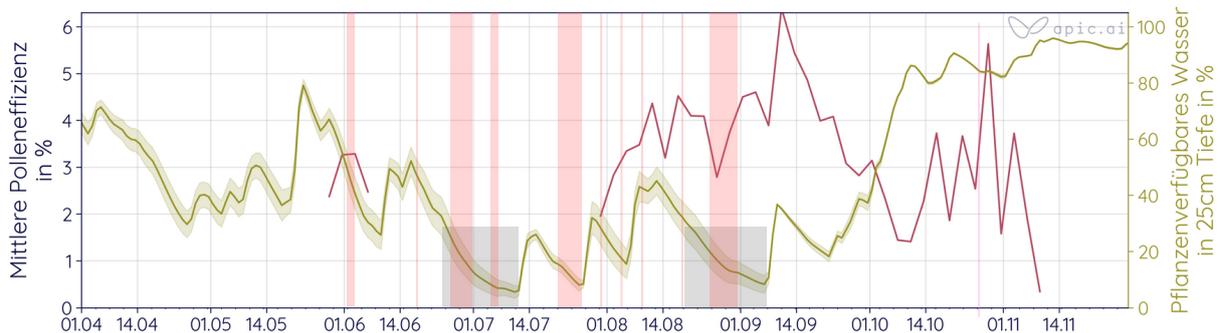
Im Jahr 2019 scheint die Polleneffizienz in der Rheinaue parallel zur zurückgehenden Bodenfeuchte abgenommen und nach Niederschlägen temporär wieder zugenommen zu haben. Von Ende Mai bis Anfang Juli lag sie recht konstant bei 2,5%. Eine ausreichende Wasserversorgung der Pflanzen war gegeben.

In den Monaten von Juli bis Mitte August ging sie zurück und lag auf einem niedrigeren Niveau als in der Hardtebene. In der zweiten Augushälfte stieg sie nach einigen Regenfällen wieder deutlich an. Ende August ging sie an einigen Tagen mit Temperaturen über 30°C und Bodenfeuchte <20% wieder zurück. Bevor sie Mitte September nach erneuten Regenfällen wieder stieg, gab es zuvor trotz großer Trockenheit einen temporären Anstieg der Polleneffizienz. Möglicherweise geben hier die Pflanzen nach der Hitzeperiode kurzzeitig wieder mehr Pollen ab. Im weiteren Verlauf des Septembers blieb der Polleneintrag relativ konstant. Das pflanzenverfügbare Wasser stieg im Oktober nach vermehrten Regenfällen binnen vier Wochen wieder auf optimale 80%. Bis die Systeme abgebaut wurden sank die Polleneffizienz kontinuierlich.

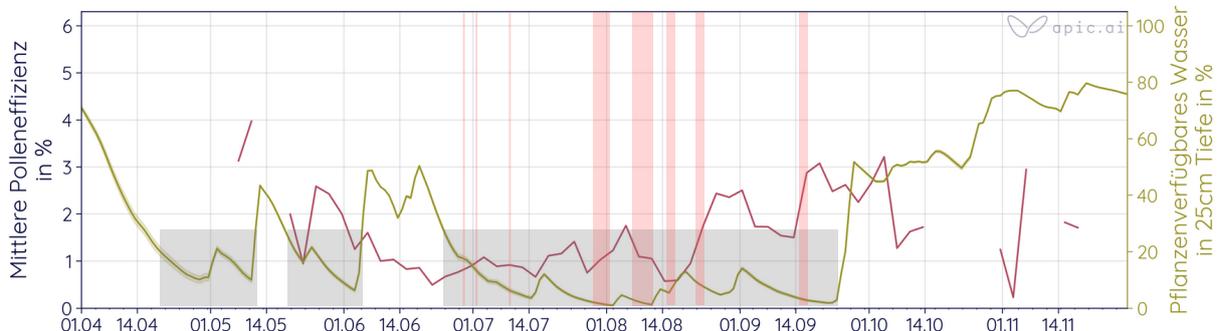
In der Rheinaue liegen aufgrund von Schwierigkeiten mit den dortigen Bienenvölkern 2020 keine durchgehenden Daten vor. Während der heißen, andauernden Trockenperiode von Mitte Juli bis Mitte August scheint die Polleneffizienz jedoch nicht geringer ausgefallen zu sein als im weniger trockenen Vorjahr.

Ettlingen

Dreitägig gemittelte Polleneffizienz und pflanzenverfügbares Wasser in Ettlingen 2019. Rot schattiert sind Tage mit Temperaturmaximum über 30 °C in Karlsruhe, grau schattiert sind mehrwöchige niederschlagsfreie Zeiträume mit nFk <30 %.



Dreitägig gemittelte Polleneffizienz und pflanzenverfügbares Wasser in Ettlingen 2020. Rot schattiert sind Tage mit Temperaturmaximum über 30 °C in Karlsruhe, grau schattiert sind mehrwöchige niederschlagsfreie Zeiträume mit nFk <30 %.



In Ettlingen stehen ab August 2019 Daten mit den erforderlichen Qualitätskriterien zur Interpretation zur Verfügung. Gleich zu Beginn des Augustes stieg die Polleneffizienz nach einer Hitzeperiode gefolgt von Niederschlägen von 2% auf 4% an. Sie blieb bis Mitte September auf diesem hohen Niveau und brach nur zwischenzeitig während einer sehr heißen Woche Ende August ein.

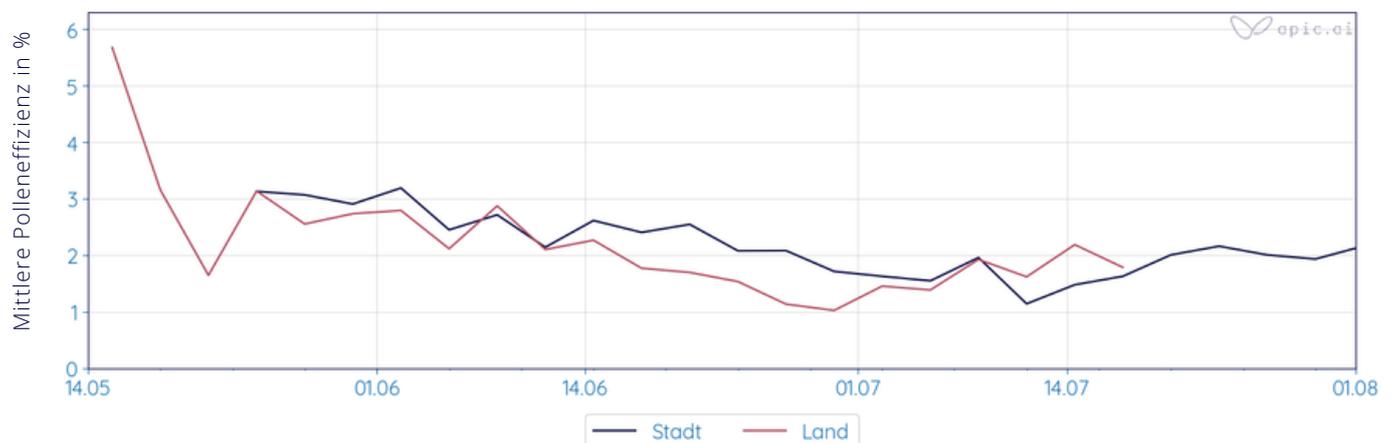
Mitte September erreicht sie mit über 5% im Anschluss an Regenfälle ihr absolutes Maximum. Bis Anfang Oktober sank sie danach langsam und kontinuierlich auf einen Wert von 1,5%. Anders als in der Rheinaue, wo am Anfang Oktober die Polleneffizienz zurückging, gab es in Ettlingen immer wieder deutliche Anstiege. Insgesamt war die Polleneffizienz in Ettlingen 2019 die höchste unter den vier betrachteten Regionen.

Im Jahr 2020 war die Polleneffizienz deutlich geringer als im Vorjahr. Vermutete Zusammenhänge, wie ein negativer Einfluss von Trockenheit und Hitze sowie ein positiver Einfluss von Niederschlägen schienen sich hier nicht zu zeigen. Nachdem sie mutmaßlich in Folge von Niederschlägen angestiegen war, sank die Polleneffizienz in einer Phase kritischer Bodenfeuchte Ende Mai auf unter 1,5 %. Nach vermehrten Niederschlägen im Juni stieg sie jedoch nicht wieder an. Auch von Juni bis Mitte August gab es kaum Schwankungen der Polleneffizienz. Während und im Anschluss an die wenigen Niederschläge gibt es nur leichte, temporäre Steigerungen. Ende August stieg der Wert wieder auf bis zu 2,5 %, obwohl das pflanzenverfügbare Wasser weiterhin in einem kritischen Bereich lag. Ein weiterer Anstieg der Polleneffizienz Mitte September zeigte sich an einigen sehr heißen Tagen. Vermehrte Niederschläge Ende September zeigen keine Wirkung auf die Polleneffizienz.

Exkurs: Stadt-Land Vergleich

Es wird gemeinhin angenommen, das Städte gegenüber ländlichen Regionen für viele Bestäuber inzwischen bessere Lebensbedingungen aufweisen. Für ländliche Regionen wird bedingt durch die große, zusammenhängende Agrarflächen von einer geringeren Vielfalt an Pflanzen ausgegangen. Um einen Vergleich zu erhalten, wurden für das Jahr 2019 Daten der Kontrollvölker einer ökotoxikologischen Feldstudie im ländlichen Gebiet nahe Bretten ausgewertet. Die Polleneffizienz lag hierbei in einem ähnlichen Bereich wie die im Stadtgebiet.

Dreitägig gemittelte Polleneffizienz zum Vergleich von Stadtgebiet und Land.





ANHANG

DANKSAGUNGEN

Nur durch die Unterstützung vieler engagierter Menschen aus der Fächerstadt, der Region und ganz Deutschland ist dieses Projekt möglich geworden. Sie leisteten einen Beitrag durch die Betreuung der Völker, die Bereitstellung von Standorten, das Labeln zum Trainieren der Neuronalen Netze, die Produktion von Prototypen und auf viele andere Weisen. Wir möchten euch und Ihnen von ganzem Herzen danken.

Andreas Fitting
 Christoph Kretschmer
 Daniel Schmid
 David Hermanns
 Eberhard Oehler
 Elias Ochs
 Elisabeth Eismann-Schmidt
 Florian Andrä
 Florian Kraft
 Florian Martini
 Friedrich G. Hoepfner
 Gernot Jöger
 Gordian Elsinger
 Harald Weiss
 Henning Naumann
 Jennifer Zeilfelder
 Joachim Hilgenfeldt
 Joachim Schemel
 Jonas Fuchs

Jürgen Hartmann
 Kai Dierenbach
 Katrin Sonnleitner
 Klaus Steinhilber
 Larissa Bühn
 Lenhard Schmidt
 Maike Thorenz
 Markus Lücking
 Matthias Dörrer
 Matthias Maier
 Matthias Vetterer
 Michael Veiga
 Nele Kemper
 Peter Allinger
 Peter Klima
 Peter Vogelpoel
 Philipp Hansert
 Rainer Romer
 Ralph Suikat

Rebecca Rutschmann
 Sigrid Rögner
 Silvia Kappler-Aumann
 Silvio Knaebe
 Simon Böhm
 Simon Fritz
 Simon Stock
 Sönke Claussen
 Stefan Essig
 Thomas Ehret
 Till Bergmann
 Till Meister
 Tim Rädsch
 Timm Czarnecki
 Timo Schneider
 Ulrich Steiert
 Vincent Ott
 Wolfgang Mende
 Yella Hoepfner

Darüber hinaus gilt unser Dank einigen Institutionen und Unternehmen sowie deren Mitarbeitern, die uns während der Projektlaufzeit begleitet und auf vielfältige Weise unterstützt haben.

AUNOVIS
 Amazon Web Services
 Balena
 Baugenossenschaft Ardensia
 Bee360
 Bienenzüchterverein Karlsru.
 CDU Fraktion Karlsruhe

Cereda
 Cyberforum
 FDP Fraktion Karlsruhe
 FÜR Karlsruhe Fraktion
 Gebrüder Mende
 Google
 Helmholtz Zentrum UFZ

Hoepfner Stiftung
 IDS
 Liegenschaftsamt Karlsruhe
 NVIDIA
 SPD Fraktion Karlsruhe
 Stadtwerke Ettlingen
 Start-up BW

QUELLEN

[1] Hallmann C.A., Sorg M., Jongejans E., Siepel H., Hofland N., Schwan H., et al. (2017). More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas. *Plos one*. Jahrgang 12, Heft 10.

[2] Bundesministerium für Bildung und Forschung. (2019). *Artenvielfalt schützen – globale Herausforderung angehen*. Abgerufen am 26.05.2020 von <https://www.fona.de/de/aktuelles/nachrichten/2019/leitinitiative-biodiversitaet.php>.

[3] Tausch, F.; Diehl, M.; Schmidt, K. (2020). *Current achievement and future developments of a novel AI based visual monitoring of beehives in ecotoxicology and for a monitoring of landscape structures*. Proceedings of the 14th International Symposium Hazards of Pesticides to Bees. 2019.

[4] Knaebe, S.; Tausch, F.; Schmidt, K.; Gonsior, G. (2020). *A feeding experiment with a sublethal neonicotinoid dosage: Effects observed with traditional assessment methods and a novel AI supported bee counter*. Proceedings of the SETAC Europe 30th Annual Meeting Open Science for Enhanced Environmental Protection (noch nicht veröffentlicht).

[5] Amt für Lebensmittelüberwachung und Veterinärwesen Karlsruhe. (2020). E-mail-Konversation zum Thema *Aktuell gemeldete Imker und Völker im Stadtgebiet Karlsruhe*.

[6] Deutsche Wildtier Stiftung. (n/a). *Wildbienen und die Honigbiene - Konkurrenz um knappe Ressourcen. Position der Deutschen Wildtier Stiftung*. Abgerufen am 09.06.2021 von https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiworLaYrxAhVG14UKHeC5CPoQFjACegQIBBAD&url=https%3A%2F%2Fwww.deutschewildtierstiftung.de%2Fcontent%2F3-naturschutz%2F1-wilde-bienen-hoch-bedroht%2F171204_nahrungskonkurrenz_honigbiene_wildbiene.pdf&usg=AOvVaw2SY0MCb627Zq9JghCa77Hn

[7] Arbeitsgemeinschaft der Institute für Bienenforschung e.V. (2018). *Stellungnahme zur Konkurrenz zwischen Wildbienen und Honigbienen*. Abgerufen am 30.05.2021 von https://www.bienenjournal.de/wp-content/uploads/2019/08/2018_07_Stellungnahme_AGLogo.pdf.

[8] Bienenzüchterverein Karlsruhe e.V. (2020). E-Mail-Konversation zum Thema *Mitgliederzahlen BZV*.

[9] Fachzentrum Bienen und Imkerei Mayen. (2019). *Bienen@Imkerei Infobrief 2019_20*. Abgerufen am 30.09.2020 von [https://www.bienenkunde.rlp.de/Internet/global/themen.nsf/0/D24F905832C652B3C125844A0034E25E/\\$FILE/Infobrief_2019_20.pdf](https://www.bienenkunde.rlp.de/Internet/global/themen.nsf/0/D24F905832C652B3C125844A0034E25E/$FILE/Infobrief_2019_20.pdf).

[10] Deutscher Imkerbund e.V. (2019). *Sommertrachternte 2019 regional ebenso unterschiedlich wie Frühtracht*. Abgerufen am 04.10.2020 von <https://deutscherimkerbund.de/download/0-557>.

[11] Fachzentrum Bienen und Imkerei Mayen. (2020). *Bienen@Imkerei Infobrief 2020*. Abgerufen am 08.10.2020 von [https://www.bienenkunde.rlp.de/Internet/global/themen.nsf/Web_P_Aktuelles_XP/1FF4812C4E87CAF8C12585BD003556E1/\\$FILE/Infobrief%202020_22%20Varroa%20kontrolle_Fr%C3%BChtrachtergebnisse.pdf](https://www.bienenkunde.rlp.de/Internet/global/themen.nsf/Web_P_Aktuelles_XP/1FF4812C4E87CAF8C12585BD003556E1/$FILE/Infobrief%202020_22%20Varroa%20kontrolle_Fr%C3%BChtrachtergebnisse.pdf).

- [12] Fachzentrum Bienen und Imkerei Mayen. (2020). *Bienen@Imkerei Infobrief 2020*. Abgerufen am 31.07.2021 von [https://www.bienenkunde.rlp.de/Internet/global/Themen.nsf/\(Web_P_Bienen_Infobrief_XP\)/3B85606C3482468EC12585EE003828FB/\\$FILE/Infobrief%202020_25%20Vermarktung%20und%20Sommertrachternte.pdf](https://www.bienenkunde.rlp.de/Internet/global/Themen.nsf/(Web_P_Bienen_Infobrief_XP)/3B85606C3482468EC12585EE003828FB/$FILE/Infobrief%202020_25%20Vermarktung%20und%20Sommertrachternte.pdf).
- [13] Fachzentrum Bienen und Imkerei Mayen. (2019). *Bienen@Imkerei Infobrief 2019*. Abgerufen am 31.07.2021 von [https://www.bienenkunde.rlp.de/Internet/global/Themen.nsf/\(Web_P_Bienen_Infobrief_XP\)/03218991B2F2BC51C125847E002BEB94/\\$FILE/Infobrief_2019_24.pdf](https://www.bienenkunde.rlp.de/Internet/global/Themen.nsf/(Web_P_Bienen_Infobrief_XP)/03218991B2F2BC51C125847E002BEB94/$FILE/Infobrief_2019_24.pdf).
- [14] Wetterkontor GmbH. (2021). Monats- und Jahreswerte für Rheinstetten bei Karlsruhe (2019 und 2020). Abgerufen am 31.07.2021 von <https://www.wetterkontor.de/wetter-rueckblick/monats-und-jahreswerte.asp?id=97&jr0=2019&jr1=2020&mo0=3&mo1=10>.
- [15] Fachzentrum Bienen und Imkerei Mayen. (2017). *Bienen@Imkerei Infobrief 2017*. Abgerufen am 31.07.2021 von [https://www.bienenkunde.rlp.de/Internet/global/themen.nsf/0/60C89042AB688759C12581640034795B/\\$FILE/Infobrief_2017_19.pdf](https://www.bienenkunde.rlp.de/Internet/global/themen.nsf/0/60C89042AB688759C12581640034795B/$FILE/Infobrief_2017_19.pdf).
- [16] Fachzentrum Bienen und Imkerei Mayen. (2018). *Bienen@Imkerei Infobrief 2018*. Abgerufen am 31.07.2021 von [https://www.bienenkunde.rlp.de/Internet/global/themen.nsf/0/E0A30B2E3D4E50E4C12582D3001F1881/\\$FILE/Infobrief_2018_17.pdf](https://www.bienenkunde.rlp.de/Internet/global/themen.nsf/0/E0A30B2E3D4E50E4C12582D3001F1881/$FILE/Infobrief_2018_17.pdf).
- [18] Fachzentrum Bienen und Imkerei Mayen. (2017). *Bienen@Imkerei Infobrief 2017*. Abgerufen am 31.07.2021 von [https://www.bienenkunde.rlp.de/Internet/global/themen.nsf/0/67D63C86A2C4A833C12581DB003C487B/\\$FILE/Infobrief_2017_27.pdf](https://www.bienenkunde.rlp.de/Internet/global/themen.nsf/0/67D63C86A2C4A833C12581DB003C487B/$FILE/Infobrief_2017_27.pdf).
- [19] Fachzentrum Bienen und Imkerei Mayen. (2018). *Bienen@Imkerei Infobrief 2018*. Abgerufen am 31.07.2021 von [https://www.bienenkunde.rlp.de/Internet/global/themen.nsf/0/FF03EBA5F7FE7189C125830F00470A18/\\$FILE/Infobrief%202018%2022.pdf](https://www.bienenkunde.rlp.de/Internet/global/themen.nsf/0/FF03EBA5F7FE7189C125830F00470A18/$FILE/Infobrief%202018%2022.pdf).
- [20] Baumkunde.de (2004-2021) Blütezeiten - Übersicht. Abgerufen am 31.07.2021 von <https://www.baumkunde.de/baumlisten/blueezeit.php>.
- [21] Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau (2019). *Bienenbäume*. Abgerufen am 31.07.2021 von https://www.lwg.bayern.de/mam/cms06/gartenbau/dateien/2019_ief_4-01_bienenbaeume.pdf.
- [22] Bund deutscher Baumschulen e.V. (2019). *KLimaArtenMatrix für Stadtbaumarten*. Abgerufen am 31.07.2021 von <https://www.die-gruene-stadt.de/klimaartenmatrix-stadtbaeume.pdf>.
- [23] Landesanstalt für Bienenkunde, Universität Hohenheim. (2020). E-Mail-Konversation zu den Themen Pestizidergebnis Befunde Pollenprojekt und Befund Pollenanalyse (Projekt Pollensammeln in Baden-Württemberg finanziert durch das Ministerium für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg).
- [24] Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. (2018). Kastanien-Sterben im städtischen Grün. Abgerufen am 13.10.2020 von <https://www.waldwissen.net/de/waldwirtschaft/schadensmanagement/komplexkrankheiten/rosskastaniensterben>.
- [25] Deutscher Wetterdienst. (2021). Climate gases (CO₂, CH₄, N₂O). Abgerufen am 09.06.2021 von https://www.dwd.de/EN/research/observing_atmosphere/composition_atmosphere/trace_gases/cont_nav/climate_gases.html.

- [26] Landesanstalt für Bienenkunde, Universität Hohenheim. (2020). E-Mail-Konversation zum Thema Pyrrolizidinalkaloide in Pollen (Projekt Pollensammeln in Baden-Württemberg finanziert durch das Ministerium für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg).
- [27] Engelmann, W., & Antkowiak, B. (2016). *Blumenuhren, Zeit-Gedächtnis und Zeit-Vergessen*. Abgerufen am 22.09.2020 von <https://publikationen.uni-tuebingen.de/xmlui/bitstream/handle/10900/67797/Blumenuhr2016-UB.pdf>.
- [28] Naturschutzbund Baden-Württemberg. (n/a). *Bienen im Regen. Wie wirken sich langanhaltende Regenfälle auf Bienen aus?*. Abgerufen am 29.09.2020 von <https://baden-wuerttemberg.nabu.de/tiere-und-pflanzen/insekten-und-spinnen/hautfluegler/wissenswertes/22475.html>.
- [29] Stadtbienen.org. (n/a). *Das Bienenjahr*. Abgerufen am 21.09.2020 von <https://www.stadtbienen.org/wissen/bienenwissen/bienenjahr/>.
- [30] Bee-careful.de. (n/a). *Das Schlafverhalten der Bienen*. Abgerufen am 28.09.2020 von <http://www.bee-careful.com/de/initiative/schlafen-bienen-nachts/>.
- [31] Hamdan, K. (2010). The Phenomenon of Bees Bearding. *Bee World*, Jahrgang 87, Heft 2, Seiten 22-23.
- [32] Waser, N. M.; Price, M. V. (2016). *Drought, pollen and nectar availability, and pollination success*. *Ecology*, 97(6), 1400-1409.
- [33] Amr El Kelish, J. Barbro Winkler, Hans Lang, Andreas Holzinger, Heidrun Behrendt, Jörg Durner, Ulrike Kanter und Dieter Ernst. (2014). *Einfluss von Ozon, CO² und Trockenstress auf das Wachstum und die Pollenproduktion der Beifuß-Ambrosie (Ambrosia artemisiifolia)*. Abgerufen am 31.07.2021 von <http://docplayer.org/40693604-Und-trockenstress-auf-das-wachstum-und-die-pollenproduktion-der-beifuss-ambrosie-ambrosia-artemisiifolia.html>.
- [34] Deutscher Wetterdienst. (2021). Klimagase (CO₂, CH₄, N₂O). Abgerufen am 24.07.2021 von https://www.dwd.de/DE/forschung/atmosphaerenbeob/zusammensetzung_atmosphaere/spurengase/inh_nav/klimagase_node.html.
- [35] Helmholtz-Zentrum Umweltforschung. (2020). UFZ-Dürremonitor. E-Mail-Konversation zum Thema Daten über pflanzenverfügbares Wasser in Karlsruhe im Jahr 2019.
- [36] Deutscher Wetterdienst. (2020). Dokumentation Bodenfeuchte. Abgerufen am 24.07.2021 von https://www.dwd.de/DE/fachnutzer/landwirtschaft/dokumentationen/isabel/bodenfeuchte_dokumentation.pdf?__blob=publicationFile&v=7.
- [37] Niedersächsisches Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Verbraucherschutz und Landesentwicklung. (2012). Bienen brauchen Blütenvielfalt - mach mit! Abgerufen am 08.10.2020 unter https://www.ml.niedersachsen.de/service/startseite_aus_ministerium/bienen-brauchen-bluetenvielfalt--mach-mit-103001.html.
- [38] Nicolas Schoof, Professur für Waldbau an der Universität Freiburg. (2021). Mündliche Auskunft und E-Mail-Konversation zum Thema Trockenstress und Pollenproduktion: Eine Frage für Bestäuberinsekten.
- [39] WetterKontor GmbH. (2021). Monats- und Jahreswerte für Rheinstetten bei Karlsruhe (1950 bis 2021). Abgerufen am 31.07.2021 von <https://www.wetterkontor.de/wetter-rueckblick/monats-und-jahreswerte.asp?id=97&jr0=1950&jr1=2021&mo0=4&mo1=4>.