

# Abschlussbericht

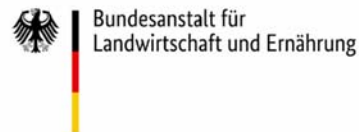
## Kurze Darstellung (Sachbericht Teil I) zum Teilvorhaben „Bienenbasiertes Biomonitoring zur Erschließung der synergetischen Wirkmechanismen von Landwirtschaft und Bestäuberinsekten“ – OCELI des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung - UFZ

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Projektträger



### Konsortium:

FZI Forschungszentrum Informatik (Koordinator)	Christoph Zimmermann, Abteilungsleiter ESS-MIT, czimmer@fzi.de
apic.ai GmbH	Katharina Schmidt, Geschäftsführerin, katharina.schmidt@apic.ai
Eurofins Agrosience Services Ecotox GmbH	Dr. Silvio Knaebe, Teamleiter Ökotox Feldabteilung, silvioknaebe@eurofins.com
Disy Informationssysteme GmbH	Dr. Andreas Abecker, Leiter Innovationsmanagement, andreas.abecker@disy.net
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ	Prof. Dr. Volker Grimm, Öko- logische Systemanalyse, volker.grimm@ufz.de



**Förderkennzeichen**

**281C307E19**

**Laufzeit / Berichtszeitraum des Vorhabens**

**07.06.2021 - 31.12.2024**

**Datum, Autor, Version**

**13.8.2025, UFZ, 2.0**

# **1. Ursprüngliche Aufgabenstellung sowie der wissenschaftliche und technische Stand an den angeknüpft wurde**

Das Verbundprojekt OCELI hatte zum Ziel, Honigbienen und Hummeln als Biosensoren für Umweltveränderungen in Agrarlandschaften nutzbar zu machen. Ziel war es ökologische Zusammenhänge zwischen landwirtschaftlicher Praxis, Nahrungsverfügbarkeit, Landschaftsstruktur und der Vitalität von Bestäuberpopulationen systematisch messbar und auswertbar zu machen. Hierfür sollte ein neuartiges, modulares Gesamtsystem aus Hardware, Software und Datenanalyse entwickelt werden, das die Flugaktivität der Bienen automatisiert erfasst, mit Umwelt- und Geodaten kombiniert und mithilfe ökologischer Modelle wie BEEHAVE und Bumble-BEEHAVE auswertet. Beide Modelle können Dynamiken über mehrere Jahre simulieren und dadurch kurzfristige Effekte von Stressoren, z.B. Pestiziden, extrapolieren und daraus neue Hypothesen ableiten. Diese Effekte sollten mit einem Kamera- und KI-basierten System erfasst werden. Ein erstes KI-basiertes visuelles System war zwar vorhanden, jedoch durch hohe Rechenanforderungen und Cloudkosten noch nicht praxistauglich. Es fehlte zudem an einer funktionierenden Schnittstelle zwischen Monitoringdaten und ökologischer Modellierung.

## **2. Ablauf des Vorhabens**

Die Umsetzung der generellen Ziele in spezifische Experimente wurde gemeinsam geplant und in monatlichen Treffen besprochen. Neue Daten und Ergebnisse sowie nächste Arbeitsschritte wurden in einem fortlaufenden Protokoll festgehalten. Durch das UFZ wurden die Projektpartner mit den Datenanforderungen, dem Aufbau, und den Ausgabegrößen von BEEHAVE vertraut gemacht. Der Partner apic.ai nutzte daraufhin BEEHAVE für die Bewertung des Nektar- und Pollenangebotes in der Landschaft. Das UFZ bildete Experimente von apic.ai und Eurofins nach, in denen die Effekte eines Neonikotinoids auf die Flugaktivität der Sammelbienen erfasst wurde. Dies erforderte eine enge Zusammenarbeit von UFZ, apic.ai, FZI und Eurofins.

## **3. Wesentliche Ergebnisse**

Die Merkmalsvariabilität ist bei Bienenvölkern um mehr als zwei Größenordnungen höher als in der Biologie üblich. Das macht reproduzierbare empirische Risikobewertungen von Pestiziden sehr aufwendig und oft unmöglich. In OCELI konnten mit Hilfe des KI-basiertes visuellen Systems differenzierte Effekte eines Pestizides auf die Flugaktivität von Pollen- und Nektarsammelbienen erfasst werden und mit Hilfe von BEEHAVE interpretiert. Ein zweites Experiment bestätigte diese Interpretation und zeigte nahezu identische Effekte wie das erste Experiment. Damit wurde erstmals ein Biosensor-System entwickelt, das sublehtale Effekte von Pestiziden reproduzierbar erfassen kann. Das BEEHAVE Modell hat damit erstmals überprüfbare und bestätigte Vorhersagen geliefert.

Das Hummel-Modell Bumble-BEEHAVE wurde in OCELI nicht eingesetzt da sein Einsatz als

Biosensor Landschaftsdaten zu Habitatansprüchen erforderten, die kaum vorhanden sind. Es wurde daher die Parametrisierung von Bumble-BEEHAVE vereinfacht, so dass in Zukunft für BEEHAVE genutzte Landschaftsdaten genutzt werden können. Somit besteht nun die Möglichkeit, zusammen mit dem von apic.ai und FZI für Hummelvölker angepassten KI-basiertem Kamerasystem Bumble-BEEHAVE ähnlich wie BEEHAVE für die Entwicklung Biosensoren zu nutzen.

#### **4. Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

UFZ und Eurofins waren auch am Projekt VIBEE (BMEL 28RZ3IP092) beteiligt, in dem eine andere Technologie zum Erfassen der Flugaktivität von Honigbienen eingesetzt wurde. Das führte zu Synergien und gemeinsamen Publikationen mit dem Julius Kühn-Institut für Bienen-schutz Braunschweig. Die Arbeiten an Bumble-BEEHAVE führten zu einer Zusammenarbeit mit dem Institut für Meteorologie und Klimaforschung Atmosphärische Umweltforschung (IMKIFU)/KIT-Garmisch Partenkirchen.

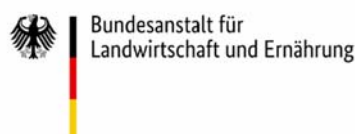
# Abschlussbericht

## Kurze Darstellung (Sachbericht Teil II) zum Teilvorhaben „Bienenbasiertes Biomonitoring zur Erschließung der synergetischen Wirkmechanismen von Landwirtschaft und Bestäuberinsekten“ – OCELI des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung UFZ

Gefördert durch:



Projektträger



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

---

### Konsortium:

FZI Forschungszentrum Informatik (Koordinator)	Christoph Zimmermann, Abteilungsleiter ESS-MIT, czimmer@fzi.de
apic.ai GmbH	Katharina Schmidt, Geschäftsführerin, katharina.schmidt@apic.ai
Eurofins Agrosience Services Ecotox GmbH	Dr. Silvio Knaebe, Teamleiter Ökotox Feldabteilung, silvioknaebe@eurofins.com
Disy Informationssysteme GmbH	Dr. Andreas Abecker, Leiter Innovationsmanagement, andreas.abecker@disy.net
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ	Prof. Dr. Volker Grimm, Ökologische Systemanalyse, volker.grimm@ufz.de



---

Förderkennzeichen  
Laufzeit / Berichtszeitraum des Vorhabens  
Datum, Autor, Version

281C307E19  
07.06.2021 31.12.2024  
13.8.2025, UFZ, 2.0

---

# Inhalt

1. Ergebnisse .....	2
1.1. Überblick .....	2
1.2. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse .....	4
1.2.1. Algorithmenentwicklung .....	4
1.2.2. Monitoringtechnologie.....	6
1.2.3. Pflanzenschutzmitteltests.....	9
1.2.4. Geodatenanalyse.....	11
1.2.5. Ökologische Systemanalyse.....	13
2. Publikationen und Wissenstransfer.....	15
2.1 Beiträge zur Wissenschaft.....	15
2.1.1 Beiträge in wissenschaftlichen Journalen .....	15
2.1.2 Vorträge.....	16
2.1.3 Poster für wissenschaftliche Konferenzen.....	17
2.1.4 Abschlussarbeiten.....	17
2.1.5 Öffentlichkeitsarbeit .....	18
3. Arbeitspakete und Meilensteine UFZ.....	19
3.1 Umsetzung der Arbeitspakete .....	19
3.1.1 Spezifikation der Gesamtlösung (AP1).....	19
3.1.2 Geodatenanalyse und Flächenbewertung (AP3).....	19
3.1.3 Ökologische Systemanalyse (AP4 Leitung UFZ).....	20
3.1.4 Fallstudien (AP6).....	24
3.1.6 Ergebnisverbreitung und -verwertung und Koordination (AP7) .....	25
3.2 Vergleich zu den ursprünglichen Zielen (Zielabweichungen begründen) .....	25
3.2.1 Erreichung der Meilensteine.....	26
4. Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....	27
5. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeit .....	27
6. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans.....	27
7. Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	28
8. Erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NKBF .....	28

# 1. Ergebnisse<sup>1</sup>

## 1.1. Überblick

Das Ziel von OCELI bestand in der Erforschung und Entwicklung einer neuartigen Technologie, die entscheidend zur Realisierung einer nachhaltigen Landwirtschaft mit intakten Bestäuberpopulationen beitragen soll. Dafür sollte das Potenzial von Honigbienen und Hummeln als Bioindikatoren nutzbar gemacht werden. In diesem Abschnitt werden die im Rahmen des Projektes erzielten Ergebnisse zur Erreichung des Zieles vorgestellt. Zunächst in einem kurzen Überblick und anschließend im Detail mit Fokus auf die Schwerpunktgebiete der einzelnen Partner.

Zu Beginn des Projektes wurde OCELI definiert als innovatives technologisches Gesamtsystem, bestehend aus Hardware und Software sowie den Workflows zur Erfassung der Umgebungsdaten und der Interpretation der Daten mittels Simulationsmodellen. Mithilfe von OCELI sollten einzelne Gefahren für Bestäuberinsekten und ihre gegenseitigen Wechselwirkungen messbar gemacht und bewertet werden können. Dazu kombinierten die Projektpartner ihre Expertise in den Bereichen Künstliche Intelligenz (KI), vernetzte Sensorik, Entomologie, Geointelligenz, Ökotoxikologie und ökologische Modellierung. Mithilfe visueller Monitoringtechnologie wurde das Potenzial von Bienen als Biosensoren erschlossen. apic.ai entwickelte ein energieautarkes, vernetztes Kamerasystem, welches am Eingang von Bienenstöcken oder Hummelkolonien installiert werden und dort kontinuierlich alle ein- und ausfliegenden Tiere filmen kann. Um die aufgenommene Aktivität qualitativ und quantitativ zu erfassen und zu verarbeiten, wurden neuronale Netze als eine Methode der Künstlichen Intelligenz (KI) eingesetzt. In enger Abstimmung von apic.ai und dem FZI wurde, teils aufbauend auf bestehenden Algorithmen und teils mit neuen Ansätzen, die hierfür notwendige Software entwickelt und optimiert. Der Fokus des FZI lag hierbei auf der Entwicklung von Algorithmen zur Erfassung neuartiger Parameter:

- die Extraktion von Farbwerten von Pollen
- die Erkennung von Hummeln
- die Erkennung von Markern auf den Bienen

apic.ai gelang es, die Algorithmen so zu optimieren, dass die Messwerte im Rahmen von experimentellen Fallstudien trotz der im Feld bestehenden Restriktionen (Strom, Internetverfügbarkeit, beschränkte Rechenleistung) parallel, in Echtzeit und über lange Zeiträume hinweg zuverlässig erhoben werden konnten.

Die beiden zentralen Anwendungsgebiete für OCELI wurden zu Beginn des Projektes gemeinschaftlich entwickelt und festgehalten. Die Entscheidung für "Lebensraumbewertung" und "Bewertung von Risikofaktoren" fiel basierend auf umfangreichen Gesprächen mit unterschiedlichen potenziellen Kunden und Partnern, darunter Landmaschinenhersteller, Saatgutproduzenten, Pflanzenschutzmittelhersteller, Hummelproduzenten und Entomologen. Bei der Auswahl wurden auch die wirtschaftlichen Verwertungspotenziale und die gesellschaftliche Relevanz der gewünschten Funktionen berücksichtigt.

---

<sup>1</sup> Die Abschnitte 1 und 2 wurden vom Konsortium gemeinschaftlich verfasst, die Abschnitte 3 und 4 vom UFZ.

Für die beiden Anwendungsgebiete wurden relevante Merkmale definiert, deren Erhebung im Rahmen von Fallstudien erprobt werden sollten, um die Machbarkeit der Erhebung zu prüfen. Zur Konkretisierung und methodisch-technischen Umsetzung der Arbeitspakete in beiden Bereichen wurden inter- und transdisziplinärer sowie in praxisorientierter Weise Fragestellungen in einer prototypischen Gesamtlösung integriert. Zudem wurden Hypothesen zu Wirkmechanismen zwischen Land(wirt)schaft und Bestäubern aufgestellt. Die während der Feldsaisons durchgeführten Fallstudien lieferten neuartige Daten, um zur Überprüfung dieser Hypothesen beizutragen. Eurofins trug hierzu die Bestäuberexpertise bei und verantwortete die Planung und Durchführung der Feldstudien samt imkerlichen Eingriffen und Datenanalysen zu klassischen und OCELI-spezifischen Fragestellungen. Die am Bienenstock erfassten Daten wurden durch räumliche Daten über die Umgebung aus einem Geoinformationssystem (GIS) ergänzt. Durch die Analyse von Geodaten zur Landnutzung im Flugradius konnten Kausalzusammenhänge zwischen Veränderungen im Umfeld der Völker mit deren Entwicklung hergestellt werden. Von Interesse war hierbei insbesondere:

- die quantitative Erfassung von Sammelflügen,
- die Quantifizierung von Bienen, die aufgrund von Mortalität oder beeinträchtigter Orientierungsfähigkeit nicht zurückkehren,
- der Eintrag von Blütenpollen als Maß sowohl der Nahrungsverfügbarkeit als auch der Bestäubungsaktivität.
- die Möglichkeit, die farbliche Differenzierung des eingetragenen Blütenpollens als Indikator für die Vielfalt der blühenden Flora in der Umgebung nutzen zu können.

Die Synthese der Geodaten, Wetterdaten, Landnutzungs- und Flugmonitoringdaten im Hinblick auf die Vitalität und Überlebensfähigkeit der Bestäuber erfolgte mithilfe des etablierten Simulationsmodells "BEEHAVE"<sup>2</sup> durch das UFZ. Hier lag der Fokus auf folgenden Bereichen:

- Interpretation einer Feldstudie, in der der Einfluss eines Pestizids auf die Flugaktivität von Nektar- und Pollensammlerinnen erfasst wurde. Die Beobachtungen der Feldstudie konnten im Modell nachvollzogen werden und führten zu Hypothesen, die sich in einer weiteren Feldstudie, die um die Erfassung markierter Individuen ergänzt wurde, bewährten.
- Beurteilung des Bedarfs an Nektar und Pollen eines Bienenvolkes in einer bestimmten Landschaft, um ggfls. Empfehlungen für den Anbau zusätzlicher Blühpflanzen zu geben.
- Test des BEEHAVE Modells mit Daten der Realität, welche im Rahmen von Feldstudien generiert wurden. In diesem Zusammenhang wurden die Effekte untersucht von (1) Verlust von Sammelbienen, (2) Verlust der Brut, (3) Verlust der Honigreserven.

---

<sup>2</sup> Becher, M. A., Grimm, V., Thorbek, P., Horn, J., Kennedy, P. J., & Osborne, J. L. (2014). BEEHAVE: a systems model of honeybee colony dynamics and foraging to explore multifactorial causes of colony failure. *Journal of applied ecology*, 51(2), 470-482.

## 1.2. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die zentralen Ergebnisse des Projekts beschrieben. Detailliertere Ausführungen zur Erzielung der Ergebnisse finden sich in Kapitel 3 der jeweils in die Umsetzung eingebundenen Projektpartner.

### 1.2.1. Algorithmenentwicklung

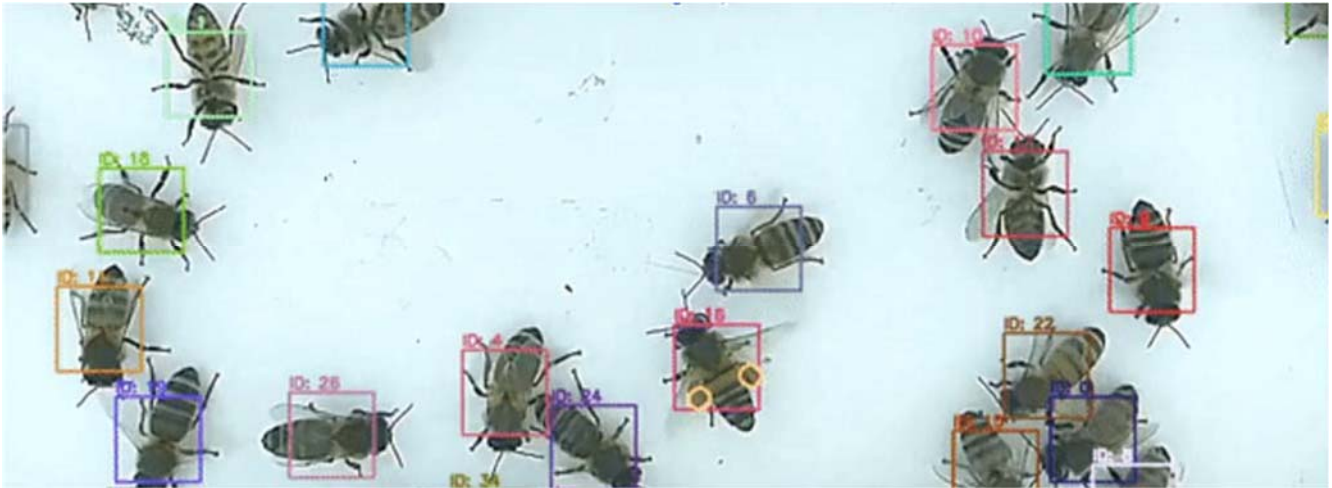


Abbildung A: Visualisierung der Arbeit des Algorithmus beim Tracking der Bienen und der Pollenerkennung.

Ein Ziel der technischen Arbeiten in OCELI war die visuelle Analyse der Kamerasysteme, um weitere Funktionen zu ergänzen und zu optimieren. Dazu wurde jeweils ein Proof-of-Concept durchgeführt:

#### 1. Die Zuordnung von multispektral aufgezeichneten Pollenbilder zu Pflanzenarten

Bei der Sichtung historischer Videodaten von apic.ai wurde festgestellt, dass das apic.ai Kamerasystem auf das sichtbare Lichtspektrum und auf sich bewegende Objekte optimiert wurde, wodurch keine laborähnliche Aufnahme der Farben ermöglicht wird. Daher wurde im Sinne eines Proof-of-Concept ein optimales System zur Farbaufnahme konzipiert, aufgebaut und eine erste Studie mit Pollen vom Bieneninstitut in Mayen durchgeführt. Dabei konnte ein R2 Score von 0.72 erreicht werden. Parallel wurde auch eine direkte Farbanalyse auf den Kamerasystemen entwickelt, die einen R2 Score von 0,52 erzielte. Es konnte im Vergleich zum Stand der Technik<sup>3</sup> von R2 0,45 so in beiden Fällen eine erhebliche Steigerung erreicht werden und durch den Abgleich mit Laborergebnissen aus durchgeführten Pollen Sammlungen ein erster automatisch erzeugter Pollenkatalog erzeugt werden (siehe Abbildung A). Die Ergebnisse wurden in einer wissenschaftlichen Publikation der Fachwelt vorgestellt<sup>4</sup>. Durch ein weiteres Training könnte dieser Katalog erweitert und verfeinert werden und so eine automatisierte Dokumentation der Blühzeiten und Blühpflanzenszusammensetzung ermöglichen.

<sup>3</sup> Borlinghaus, P., Gülzow, J. M., & Odemer, R. (2024). In-hive flatbed scanners for non-destructive, long-term monitoring of honey bee brood, pathogens and pests. *Smart Agricultural Technology*, 9, 100655

<sup>4</sup> Tausch, F., Wagner, J., & Klaus, S. (2023). Pollinators as Data Collectors: Estimating Floral Diversity with Bees and Computer Vision. In *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision* (pp. 643-650).

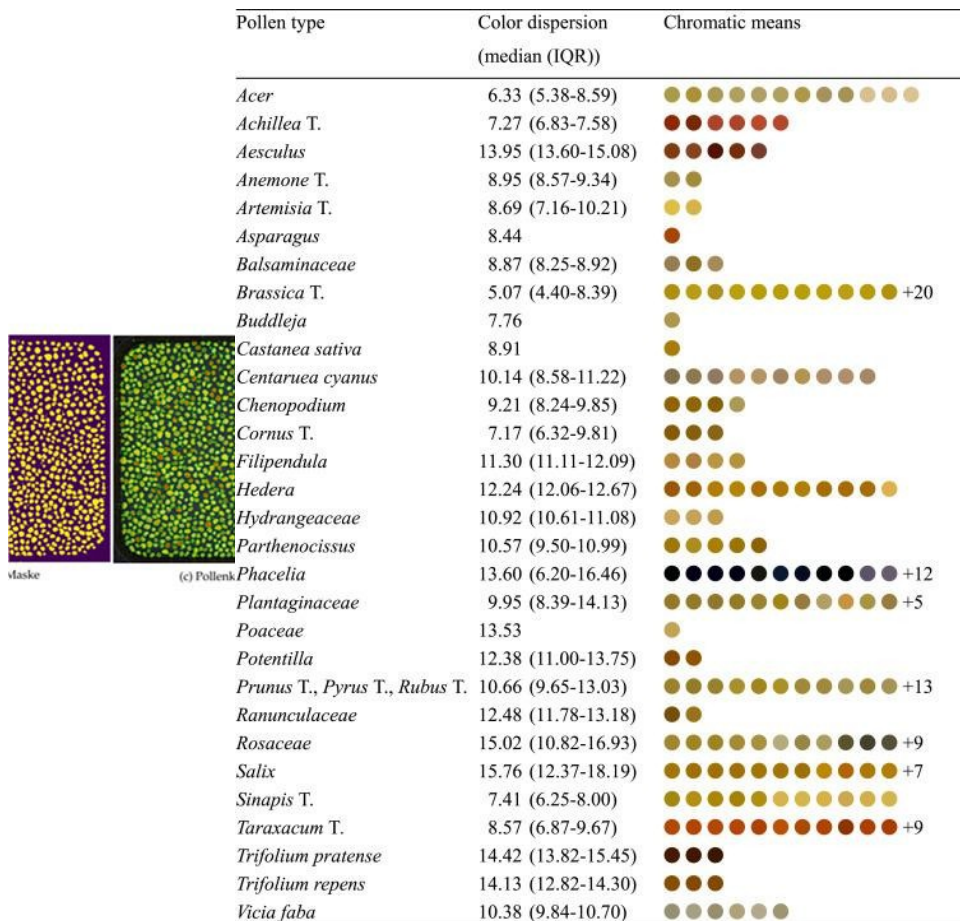


Abbildung B: Prozess der Vorverarbeitung der Rohbilder (links) von oben nach unten: 1. Bildaufnahme, 2. Binäre Maske, 3. Pollenkontur, 4. Mittelwertdarstellung, Pollenkatalog (rechts).

## 2. Die automatisierte Erkennung von individuellen Bienen durch Marker

Im Rahmen des Projekts wurde die individuelle Beobachtung von Bienen als relevant identifiziert und durch die Verknüpfung der Projektpartnern-Expertisen realisiert. Im ersten Schritt markierte Eurofins Bienen mit Opalith-Plättchen, die anschließend durch das apic.ai Kamerasystem aufgezeichnet und mittels Algorithmen analysiert wurden. Der erste Proof of Concept (PoC) im Frühjahr 2022 verlief erfolgreich, sodass die Erkenntnisse in produktive Algorithmen für weitere Fallstudien übertragen wurden. Technische Anpassungen zur Verbesserung des Systems umfassten die Integration der Pollen- und Markererkennung in einem einzigen Verarbeitungsschritt mit einer stabilen Bildverarbeitungsrate von über 20 fps. Zudem wurden neue, selbst gedruckte Marker entwickelt, die die Generierung von 992 unterscheidbaren Identifikationszeichen über zweistellige Buchstaben, Zahlen und Sonderzeichen ermöglichen. Insgesamt bietet die Lösung einen erheblichen Mehrwert, indem sie eine detaillierte Verfolgung und Analyse des Flugverhaltens einzelner Bienen ermöglicht und im Vergleich zu einem Tracking über RFID-Tags eine einfachere Anbringung, geringere Kosten pro Tag und insbesondere die Möglichkeit bieten, zu erkennen, ob ein Individuum beim Einflug Pollen bei sich trägt oder nicht. Dieses neue Verfahren kann für zukünftige Forschungsarbeiten von großem Nutzen sein, um das Sammelverhalten zu untersuchen und auch

detaillierte Einblicke in die Wirkmechanismen von Pflanzenschutzmitteln bei der Risikobewertung geben.

### 3. Übertragbarkeit auf Hummeln

Eine weitere Gattung mit ihren spezifischen Besonderheiten in das Monitoring zu integrieren, könnte einen erheblichen Mehrwert der technischen Gesamtlösung erbringen. Das apic.ai Kamerasystem wurde zwar in der Vergangenheit bereits an Hummelvolk eingesetzt, aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen scheint ein Einsatz mit hoher Stichprobe jedoch nicht wirtschaftlich sinnvoll. Daher wurde ein eigenes kompaktes Hummelsystem entwickelt, mit der Anforderung über 12 Wochen mit einem eingebauten Akku eine Hummelstudie zu begleiten und die Bildverarbeitung auf dem Gerät durchzuführen. Ein kapazitiver Sensor erwies sich als zuverlässiger und energieeffizienter Aktivitätssensor, mit einem Energieverbrauch von nur 58 mW im Standby-Modus. Das verwendete neuronale Netz der Kameraauswertung zeigte in einer Feldstudie eine Erkennungsrate von über 97% (> 66% bei verschmutzten Sichtfeld) bei einem Leistungsbedarf von nur 1,15 W. Durch weitere Trainingsdaten und Optimierung der Netzarchitektur könnte die Erkennungsrate noch weiter verbessert werden, zudem wäre eine Erweiterung des Netzes an verschiedene Hummelarten neben der untersuchten *Bombus terrestris* möglich. Das entwickelte System erfüllt die grundlegenden Anforderungen für die weitere Erforschung von Hummeln und deren Verhalten und könnte durch die geringeren Materialkosten eine Möglichkeit für großskalige, detaillierte Hummels tudien bieten.

#### 1.2.2. Monitoringtechnologie

Zu Beginn des Projektes wurden die technischen Herausforderungen identifiziert, die mit der Implementierung des OCELI Systems zu lösen sein würden. Dazu zählten insbesondere die Minimierung des Energiebedarfs, limitierte Rechenleistung und Konformität mit der Guten Laborpraxis. Darüber hinaus wurden technischen Ziele definiert, deren Erreichbarkeit mit dem OCELI System demonstriert werden sollten. Dazu zählten die automatisierte Pollenfarberkennung, die on-Device Datenanalyse in Echtzeit und die Marker-Identifikation zum Zweck der Erkennung markierter Bienen. Iterativ wurde über mehrere Saisons in einem sich wiederholenden Zyklus aus Anforderungsanalyse, Prototypenbau, Feldtest und Ergebnisanalyse ein Demonstrator entwickelt, welcher alle Anforderungen erfüllt und die gewünschten Messwerte erheben kann.



Abbildung C: Demonstratoren im Einsatz einer Studie zur Landschaftsbewertung.

Hier die wichtigsten Schritte:

- Realisierung der Echtzeitauswertung im Feld durch Optimierung von Softwarekomponenten und Erweiterung der Kameraeinheit um spezialisierte Beschleuniger zur visuellen KI-Analyse. Die entwickelten Systeme können dadurch simultan mehrere Datenströme erfassen und verarbeiten, wie etwa die Aktivität der Bienen, Polleneintrag und die Erkennung von Markern auf den Bienen.
- Automatisierte Kamerakalibrierung über Methoden der Optimierung. Dabei wurde der Messbereich der Kamera über die Kalibrierung von Belichtungszeit, Weißabgleich und Empfindlichkeit optimal auf das Spektrum der Pollenfarben angepasst. Hierbei war eine gute Abgrenzung zu den Tieren und zum Hintergrund zu gewährleisten. Es galt, die Bildqualität und Farbtreue der Datenbasis zu maximieren, um Kenntnisse über die Möglichkeiten der Differenzierung zu erlangen.<sup>3</sup>
- Optimierung der energieverbrauchenden Komponenten und intelligentes Energiemanagement, um den Dauerbetrieb der Systeme mit dem zu erwartenden Leistungsbedarf durch die höhere GPU-Leistung zu gewährleisten.
- Aufbau einer geeigneten Ablagestruktur für die Daten und Entwicklung eines Tools zur schnellen Analyse.
- Tests zur Validierung der Eignung des Monitoringsystems zum Zweck der Erfassung von Bienenverlusten.
- Re-identifikation von Bienen, die zuvor mit visuellen Markern beklebt wurden, in Zusammenarbeit mit dem FZI. Im Rahmen des Oomen Versuchs 2023 wurden über 18.000 Re-ID Bilder gespeichert und ausgewertet.



Abbildung D: Ausschnitt aus dem Sichtfeld des Kamerasystems; Ausschnitt einer markierten Biene.

- Visualisierung der Bienendaten in Echtzeit auf Dashboards. Hierdurch konnten auch Probleme erkannt und schneller behoben werden.

Prozesse, die jenseits der Technologie entwickelt wurden:

- In enger Zusammenarbeit von apic.ai und Eurofins wurden Herausforderungen und Bedarfe für Prozesse betreffend die Konformität mit der Guten Laborpraxis (GLP) ausgearbeitet. Es wurden notwendige Optimierungen zur Erreichung von Konformität mit den Anforderungen definiert und umgesetzt. Für die folgenden, zuvor definierten Fragestellungen wurden Lösungen gefunden:
  - (1) Aufteilung von Zuständigkeit, Berechtigungen und Restriktionen durch Service Level Agreements,
  - (2) Dokumentation von Eingriffen bei technischen Problemen durch verschiedene Parteien in definierten Dokumenten, für Eingriffe vor Ort oder aus der Ferne,
  - (3) Definition, Speicherung und Übergabe von "Rohdaten"; und Zuständigkeit für die Sicherung,
  - (4) Maßnahmen zur Minimierung des Risikos von Datenverlusten, insbesondere die Möglichkeit zur Datensicherung während der Studien, sowie
  - (5) die Dokumentation und Nachvollziehbarkeit der Funktionalität der Systeme vor und während der Datenaufnahme sowie deren Dekommissionierung nach Studienende.

Test zu möglichen Erweiterungspotenzialen der Technologie:

Es wurde eine Machbarkeitsstudie zum Monitoring von Wildbienen (*Osmia* und *Megachile*) mittels eines prototypischen Hardware-Aufbaus durchgeführt, um die Übertragbarkeit des Analyseansatzes zu validieren.



Abbildung E: Prototypischer Aufbau eines Monitoringsystems für bestimmte Wildbienen.

Zudem gab es eine intensive Auseinandersetzung mit den Möglichkeiten mittels automatisiertem Monitoring von Bienen und anderen Indikatorspezies Biodiversitätsassessments durchzuführen. Es wurden zahlreiche Gespräche mit möglichen Nutzergruppen durchgeführt, z.B. Immobilienentwickler und Baugenossenschaften. Es wurden ein Flyer und ein Siegel entwickelt, um die Möglichkeiten des

Monitorings darzustellen und Feedback potenzieller Kunden zu sammeln. apic.ai wurde Teil der Expertengruppe Biodiversität der Deutschen Gesellschaft Nachhaltiges Bauen (DGNB) und konnte im Rahmen mehrerer Sitzungen sehr viel über die Anforderungen der Landschaftsgestaltung von Betriebsgeländen und Firmenstandorten erfahren, sowie selbst zur Diskussion beitragen.

### 1.2.3. Pflanzenschutzmitteltests

Validierung von Möglichkeiten zur Verbesserung, Automatisierung und Erweiterung ökotoxikologischer Testmethoden, für die Prüfung und Zulassung von Pflanzenschutzmitteln.

- Empirische Tests zur Auswirkung letaler und insbesondere subletaler Effekte von Pestiziden würden eine Anzahl an Wiederholungen, d.h. Test-Völkern, erfordern, die nicht realisierbar ist. Der Grund hierfür ist die extreme hohe Vielfalt in den Merkmalen und Verhalten der Bienenvölker, die über eine Größenordnung höher ist als bei den meisten Tierarten. Das Modell BEEHAVE wurde deshalb bereits von der EFSA (European Food Safety Authority) eingesetzt, um die natürliche Variabilität der maximalen Volksgröße abschätzen zu können<sup>5</sup>. Mittels BEEHAVE wurde ein Feldversuch zu den Effekten eines Insektizides nachgestellt und interpretiert, und die resultierenden Hypothesen in einem neuen Versuch getestet und bestätigt. Dabei stellte ich heraus, dass der im Feld beobachtete Effekt reproduzierbar war, d.h. sowohl im Versuch 2019 also auch in 2023 auftrat. Somit ist erstmalig die Möglichkeit gegeben, mittels der von apic.ai im Rahmen von OCELI entwickelten Technologie und Software, reproduzierbare Risikobewertungen von Pestiziden im Feld, d.h. in Agrarlandschaften, mit frei fliegenden Honigbienen durchzuführen<sup>6</sup>.



Abbildung F: Nachbeobachtungsphase einer Studie zur Messbarkeit von Effekten von Pflanzenschutzmitteln

<sup>5</sup> European Food Safety Authority (EFSA), Ippolito, A., Focks, A., Rundlöf, M., Arce, A., Marchesi, M., ... & Auteri, D. (2021). Analysis of background variability of honey bee colony size (Vol. 18, No. 3, p. 6518E).

<https://efsa.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2903/sp.efsa.2021.EN-6518>

<sup>6</sup> Wang M, Tausch F, Schmidt K, et al. Reduced Honeybee Pollen Foraging under Neonicotinoid Exposure: Exploring Reproducible Individual and Colony Level Effects in the Field Using AI and Simulation. Environmental Science and Technology. 2025; 59(10):4883-4892. doi:10.1021/acs.est.4c13656.

im Feld samt Demonstratoren und Wetterstation.

- Messung von Repellenz-Effekten. Ziel: Prüfung, ob die Erfassung von Aktivität und Polleneintrag präzise und zuverlässig genug ist, um eine temporäre Nicht-Aktivität der Bienen zu messen, die für bestimmte Substanzen bereits nachgewiesen wurde. Die folgende Abbildung zeigt, dass dies erfolgreich war. In der Pyrethroid-Gruppe kehrten die Bienen nach der Applikation in ihren Stock zurück und verließen ihn für ca. 90 Minuten nicht mehr. Danach normalisierte sich die Aktivität binnen wieder. In der Gruppe wurde durch Eurofins eine deutlich geringere Mortalität gemessen.

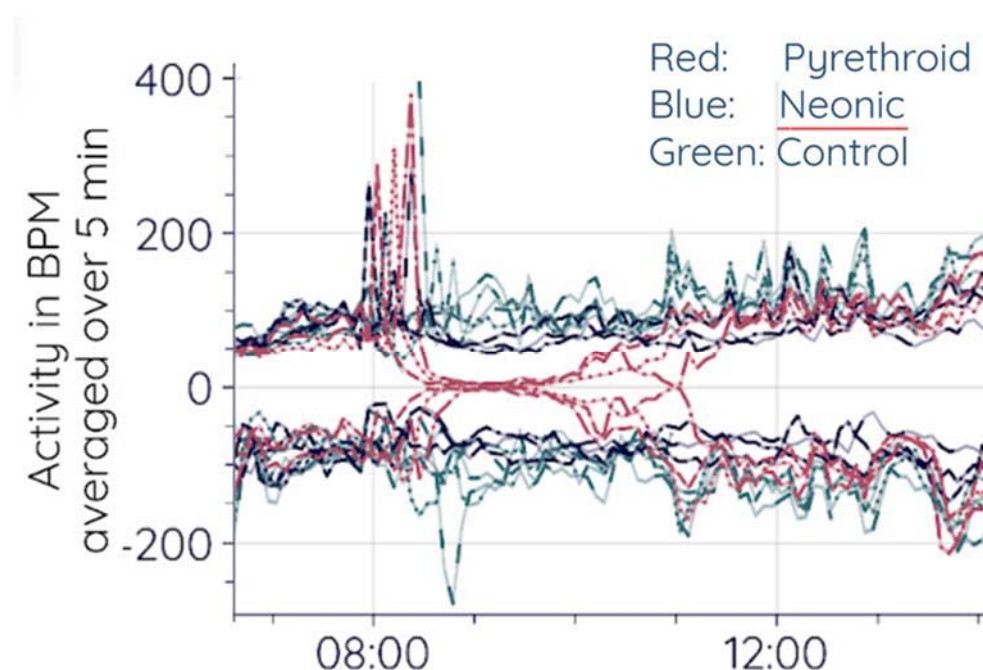


Abbildung G: Visualisierung minütlich gemessener Bienenaktivität im Versuch mit drei Gruppen. Die vier Völker, die Kontakt mit der repellenten Substanz hatten (rot), stellten temporär die Aktivität ein.

Der Versuch eröffnet die Perspektive Pflanzenschutzmittel in Kombination mit repellenten Substanzen zu applizieren, um den Kontakt von Bienen und anderen Bestäubern während der Applikation reduzieren und durch geringere Exposition unerwünschte Nebeneffekte (letal wie auch subletal) zu reduzieren. Dies könnte entscheidend dazu beitragen, die Bestäuberfreundlichkeit der Landwirtschaft zu erhöhen.

Integriert in den Versuch wurden die Effekte mittels Re-ID auch auf Ebene von Kohorten, frisch geschlüpfter Bienen und erfahrener Sammlerinnen untersucht. Der Versuch gelang und es konnten Auswirkungen auf das Überleben, das "Age of first foraging" und die Rekrutierung gemessen werden. Zu sehen ist dies auch in den Daten der frisch geschlüpften Bienen der Völker CA (Kontrollgruppe) und T2a (exponierte Gruppe) in Abbildung H. Die Jungbienen der Kontrollgruppe begaben sich erst nach einigen Tagen aus dem Volk und übernahmen auch dann noch nur in geringem Umfang Sammelaufgaben. Die Bienen gleichen Alters in der exponierten Gruppe begannen gleich nach der Exposition intensiv zu sammeln und nahmen die Funktion deutlich älterer Bienen ein.

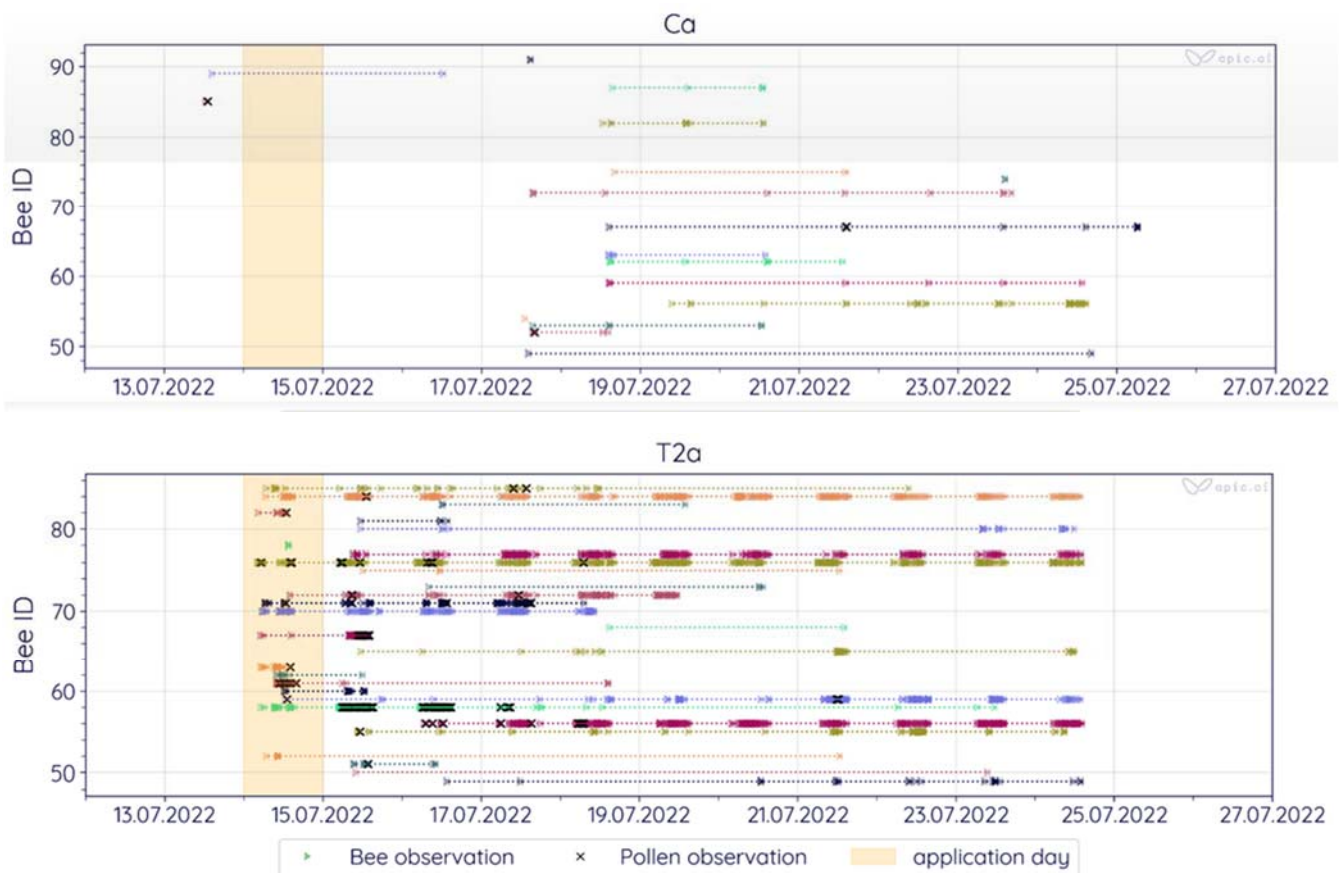


Abbildung H: Darstellung der Aktivität von frisch geschlüpften Bienen der Kontrollgruppe (oben) und der exponierten Gruppe (unten).

Nach der Vorstellung der vielversprechenden Ergebnisse beim Beenovation Kick-off, kam es zu einem Austausch mit dem Deutschen Bauernverband. Dessen Vertreter zeigten sich sehr interessiert an den gemessenen Repellenz-Effekten. Daneben gab es einen Austausch mit einem großen Pflanzenschutzmittelhersteller über Anknüpfungsmöglichkeiten zur Hebung der Potenziale von Repellenz-Effekten. Das Interesse an dem Ansatz war groß, insbesondere bezüglich folgender Möglichkeiten:

- Das Einsatzfenster der Applikation der Substanzen zu verändern, sodass sie nicht nur außerhalb des Bienenflugs eingesetzt werden können.
- Erneute Zulassung von Substanzen, welche diese verloren haben, insbesondere bezüglich Kleinkulturen wie verschiedener Gemüsesorten.

Unsere Gesprächspartner beim Bauernverband waren der Meinung, dass eine Proof-of-Concept Studie sinnvoll wäre. Gleichzeitig sehen sie die Verantwortung hierfür nicht bei sich, sondern bei den Produzenten der Pflanzenschutzmittel oder auf Seiten der Politik.

#### 1.2.4. Geodatenanalyse

Entwurf und prototypische Realisierung von kontextsensitiven, geo-temporalen Datenanalysen und Verknüpfung der Daten aus dem Bestäuber-Monitoring mit räumlichen Umgebungsdaten, um neuartige, automatisierte Methoden der Flächenbewertung und die Datenbereitstellung für die anderen Funktionen zu realisieren.

- Pilotierung eines Lebensraumvergleichs zur Erfassung der Bestäuberfreundlichkeit verschiedener Land(wirt-)schaftsstrukturen. Erfassung von Langzeitdaten aus dem KI-basierten Bestäubermonitoring und Kombination mit Gewichtswerten, Umgebungsdaten und Pollenanalysen. Die Erfassung von Langzeitdaten wurde im Jahr 2022 pilotiert und 2023 verfeinert. 2023 konnten erfolgreich Daten über mehrere Monate von je vier Bienenvölkern an zwei Standorten mit unterschiedlichen Landschaftsstrukturen gesammelt werden. Die Aktivitäten wurden hierzu auch mit dem JKI abgestimmt, welches die Datenerfassung in der großstrukturierten Landschaft betreute. Es konnte gezeigt werden, dass ein Vergleich von Lebensräumen über die Aktivität, den Eintrag von Pollen und den Anteil der Pollensammlerinnen möglich ist. Die folgenden Grafiken legen nahe, dass die Bienen im großstrukturiert geprägten Königslutter über weite Teile des Jahres aktiver waren und mehr Nahrung in Form von Pollen sammeln konnten als jene im kleinstrukturierten Stutensee.

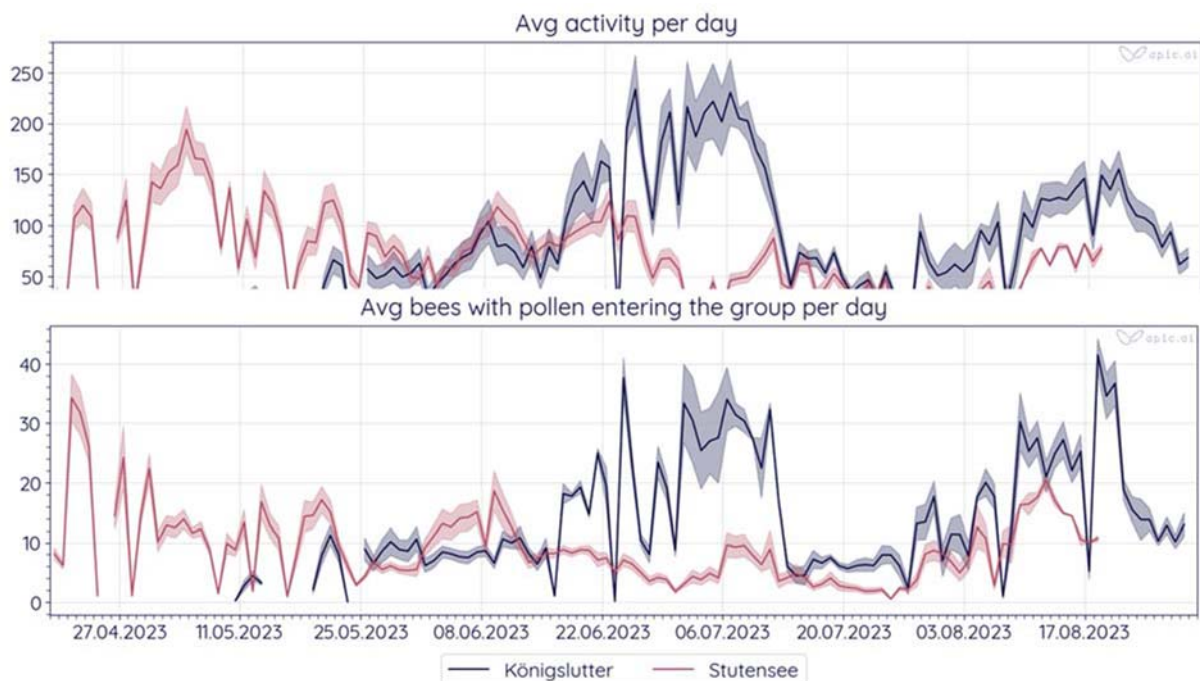


Abbildung I: Darstellung der Messwerte von zwei Gruppen von Bienenvölkern an strukturell verschiedenartigen Standorten im Jahresverlauf durchschnittliche Einflugaktivität in Bienen pro Minute (oben) und durchschnittlicher Polleneintrag in Bienen mit Pollen pro Minute (unten). Der schattierte Bereich zeigt Unsicherheit und Variabilität innerhalb jeder Gruppe. Qualitätskriterien: Zwischen Sonnenauf- und Untergang sind mindestens 90 % der Daten von mindestens 3 von 4 Völkern verfügbar, sonst werden Lücken dargestellt.

- Analyse von Umweltfaktoren auf die Bienen- und Sammelaktivität: Die Langzeitdaten aus Stutensee in den Jahren 2022 und 2023 wurden mit räumlichen Umgebungsdaten, wie Wetterdaten, Landnutzungsdaten oder den Daten zur Biodiversität (Simpson-Index), die aus eigenen Pollenbeobachtungen abgeleitet wurden, angereichert. Auf verschiedenen Wegen wurden diese Daten vorverarbeitet. Anschließend wurden verschiedene Machine Learning-Ansätze angewendet, um den Einfluss der Umweltfaktoren auf die Bienen- und Sammelaktivität zu modellieren. Durch die Anwendung von Methoden der Explainable AI konnte dann die Bedeutung der einzelnen Umweltfaktoren auf die Bienen- und Sammelaktivität abgeleitet werden. Grundlegend ergab sich eine sichtbare Variabilität darüber, welche Umweltfaktoren für die Bienen- und Sammelaktivität am

wichtigsten sind. Dies waren, je Vorverarbeitung und Modellierungsansatz. Sonnenfaktoren (wie Tages- und Jahreszeit, Sonnenscheindauer), Temperatur oder relative Luftfeuchtigkeit, die beständig zu den wichtigsten Umweltfaktoren gehörten. Auch die Biodiversität erwies sich als wichtiger Faktor, während für die Landnutzung (Art und Zusammensetzung) per se hier keine zentrale Rolle nachgewiesen werden konnte hier wären jedoch für weiterführende Analysen auch kleinräumigere Eingangsdaten vonnöten gewesen. Dies ist in der folgenden Abbildung dargestellt, welche die 20 wichtigsten Parameter für die Beobachtungen von 2022 und 2023 aggregiert über die verschiedenen Analysen zeigt. Insgesamt waren typischerweise 70-80 % der beobachteten Variabilität über die berücksichtigten Umweltfaktoren erklärbar. Somit bietet die KI-basierte Überwachung von Bienenstöcken und die ML-basierte Datenanalyse grundsätzlich eine gute Plattform zum Studium der Bienen- und Sammelaktivität und ermöglicht ein tieferes Verständnis ihrer Abhängigkeit von verschiedenen Umwelteinflüssen. Hier sind jedoch in der Zukunft sicherlich noch deutlich umfangreichere Untersuchungen möglich und notwendig. Im OCELI-Vorhaben konnten hierfür methodische und softwaretechnische Grundlagen bereitet werden.

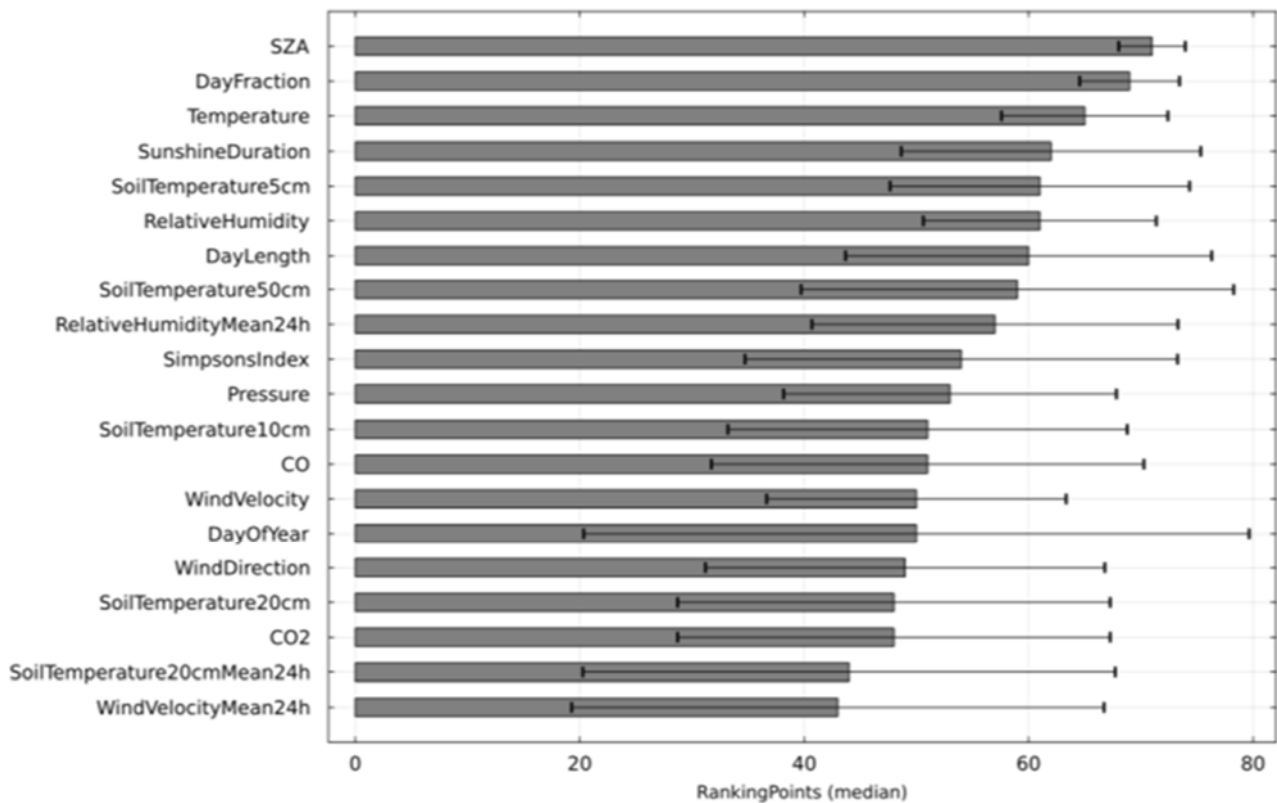


Abbildung J: Darstellung der 20 wichtigsten Parameter für die Beobachtungen von Bienenaktivität und Nahrungseintrag, basierend auf Daten von 2022 und 2023, aggregiert über verschiedene Analysen.

### 1.2.5. Ökologische Systemanalyse

Untersuchungen zur Erklärbarkeit von Effekten im Freiland mittels Simulationsmodell BEEHAVE.

- Die bereits erwähnten Simulationen der Feldversuche zur Risikobewertung zeigten eine überraschend gute Übereinstimmung. Hierbei wurden die entsprechenden Wetterdaten verwendet, aber keine detaillierte Darstellung der umgebenden Agrarlandschaft. Für die Reproduktion der Flugaktivität reichte es aus, eine Standardoption von BEEHAVE zu verwenden, in der summarisch je ein Frühjahrsund Sommertrachtverlauf angenommen wird. Dies ist ein wichtiges Ergebnis:

wenn nicht die Landschaftsbewertung im Vordergrund steht, und wenn es um Bestäubungsleistungen bzw. Sammelflüge geht, liefert bereits die Annahme einer summarischen Nahrungsverfügbarkeit gute Ergebnisse.

- Pilotierung einer Lebensraumbewertung für Bienen über die Dauer von mehreren Monaten. Schwerpunkt der Untersuchung war die Verfügbarkeit von Pollen und Nektar im Zeitverlauf sowie die Nahrungsvielfalt. Im Feld wurden hierzu "Ist"-Daten von Bienenvölkern gesammelt, welche die tatsächliche Verfügbarkeit von Pollen wiedergeben. Diese wurden mit "Soll"-Werten zur Nahrungsmenge aus BEEHAVE Simulationen verglichen, welche den Bedarf der Völker entsprechend dem Stand der Forschung darstellen. Die Bewertung der Pollenverfügbarkeit wurde erfolgreich mit dem Kamerasystem von OCELL umgesetzt. Für den konkreten Studienort und -zeitraum wurde im Vergleich zu den BEEHAVE Annahmen ein Überangebot an Pollen gemessen. Die Bewertung der Nektarverfügbarkeit wurde mit kommerziell verfügbaren Stockwaagen umgesetzt. Für diese wurde eigens eine Messeinheit entwickelt, um eine höhere Auflösung zu erzielen. In der Studie wurde ein deutlicher Mangel an Nektar gemessen. Dies deckte sich mit der Beobachtung des Imkers, der aufgrund des Nahrungsmangels zufüttern musste. Es zeigte sich jedoch, dass die OCELL-spezifischen Erweiterungen nicht zu einer relevanten Verbesserung des Detailgrads der Gewichtswerte beitragen konnten. Kommerziell verfügbare Waagen können entsprechend im Vergleich mit BEEHAVE genauso gute Ergebnisse liefern. Die Nahrungsvielfalt wurde mittels Pollenproben untersucht, die in regelmäßigen Abständen mit von Pollenfallen gesammelt wurden. Diese Proben wurden zur Analyse in ein Labor geschickt. Die Ergebnisse wiederum wurden genutzt, um die Verfahren zur automatisierten Vielfaltserkennung zu entwickeln. Quantifiziert wurde die Vielfalt des Nahrungsangebotes mit dem sogenannten Simpson's Index. Die Ergebnisse und das Vorgehen zur automatisierten Erfassung der Pollenfarben können im entsprechenden Paper nachgelesen werden.
- Weiterentwicklung einer 2019 durchgeführten Fütterungsstudie im Freiland in Kombination mit der Re-identifikation von Kohorten markierter Bienen. Die 2019 erhobenen Ergebnisse konnten mit der Simulation von BEEHAVE zu den Effekten einer subletalen Dosis eines Neonikotinoids in Einklang gebracht werden. Dies ist ein beeindruckendes Ergebnis, welches die Relevanz von Simulationsmodellen wie BEEHAVE demonstriert und eine Chance für deren Nutzung zum Einsatz des Schutzes von Bestäubervorkommen darstellt. Mit der Wiederholung des Versuchs sollte geprüft werden, ob die Ergebnisse reproduzierbar sind und nicht etwa Zufall. Zusätzlich sollte mit der Integration der Erhebung von Daten von Kohorten markierter Individuen die Hypothese für die Ursache der Effekte geprüft werden. Die mit den Daten der ersten Studie erstellte Hypothese besteht darin, dass die Substanz die sogenannte Handling-Time, also die Dauer von Sammelflügen, um den Faktor 10 erhöht, indem sie das vegetative Nervensystem der Bienen beeinträchtigt. Dies konnte anhand der beobachteten Flugdauern der markierten Bienen in der Behandlungs- und Kontrollgruppe geprüft werden. Die Reaktion der Bienen auf Volksebene war bezogen auf die Aktivitätsdaten und den Polleneintrag sehr ähnlich zu jener, die 2019 beobachtet werden konnte. Anders als damals hielt der Effekt jedoch auch über die Expositionsdauer hinaus

an und wurde nicht kompensiert. Dies könnte damit zusammenhängen, dass die Studien zu unterschiedlichen Jahreszeiten stattfanden oder auch mit dem verfügbaren Nahrungsangebot. In Bezug auf die Effekte auf Individualebene zeigte sich, dass der vorhergesagte Effekt auf die Handling-Time in der Tat auftrat, allerdings nur um einen Faktor von ca. 2 bis 3. Eine entsprechende Publikation stellt die Methoden und Ergebnisse im Detail dar.

Verbesserung des Simulationsmodells BEEHAVE durch Training mit realen Messwerten und dadurch neue Einsichten in die Faktoren, welche die Vitalität der Bienenvölker bzw. -populationen bestimmen.

- Es wurden sog. "Stressexperimente" an Bienenvölkern durchgeführt, bei denen entweder die komplette Brut entnommen wurde, oder die Sammelbienen (indem der Bienenstock so weit verschoben wurde, dass die Sammelbienen ihn bei der Rückkehr nicht mehr fanden). Es wurden Flugaktivitäten aufgenommen sowie die sog. Volksentwicklung, d.h. geschätzte Werte der Brutentwicklung und Volksgröße. Die Stressexperimente wurden mittels BEEHAVE nachgestellt. Die Volksentwicklung wurde weitgehend reproduziert, während es bei der Flugaktivität teilweise deutliche Unterschiede in der Antwort auf den Stress gab (Wang et al., in Vorbereitung). Die Ergebnisse bestätigen zum einen, dass BEEHAVE Grundmechanismen der Volksentwicklung richtig wiedergeben kann, aber die Daten zur Flugaktivität waren aufgrund der geringen Anzahl an Wiederholungen (je vier Kontroll- und Behandlungsvölker) zu variabel, um weitere Einsichten zu erlangen.

## 2. Publikationen und Wissenstransfer

### 2.1 Beiträge zur Wissenschaft

#### 2.1.1 Beiträge in wissenschaftlichen Journalen

- Odemer, R., Jakoby, O., Barth, M., Knäbe, S., Pistorius, J., & Schmidt, K. (2024). Making way for the implementation of automated bee counters in regulatory risk assessment. *Journal of Applied Entomology*, 00, 1–7. <https://doi.org/10.1111/jen.13256>.
- Wang M., Tausch F., Schmidt K., Diehl M., Knaebe S., Bargaen H., Materne L., Groeneveld J., Grimm V. Honeybee pollen but not nectar foraging greatly reduced by neonicotinoids: insights from AI and simulation. *Computers and Electronics in Agriculture*; Volume 221 (2024); ISSN 0168-1699, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108966>.
- Borlinghaus, P., Tausch F., and Odemer R. Natural color dispersion of corbicular pollen limits colorbased classification. *ISPRS Open Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*; Volume 12 (2024), ISSN 2667-3932, <https://doi.org/10.1016/j.ophoto.2024.100063>.
- Tausch F., Wagner J., Klaus S. Pollinators as Data Collectors: Estimating Floral Diversity with Bees and Computer Vision. *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV) Workshops*, 2023, pp. 643-650.
- Wang M., Tausch F., Schmidt K., Diehl M., Knaebe S, Bargaen H, Faramarzi F, Grimm V. Reduced Honeybee Pollen Foraging under Neonicotinoid Exposure: Exploring Reproducible Individual and Colony Level Effects in the Field Using AI and Simulation. *Environmental Science and*

*Technology*. 2025; 59(10):4883-4892. doi:10.1021/acs.est.4c13656.

- Luttermann, M., Prestele, R., Grimm, V., & Groeneveld, J. (2025). Expanding the Scope of the Bumblebee Model BEE-STEWART: A Simple Foraging Module Facilitates the Parameterization. *Ecology and Evolution*, 15(5), e71468.

Eingereicht:

- Wang M., Grimm V., Requier F., Groeneveld J., Bargen H., Knaebe S., Odemer R. Pesticide impacts on honey bee foraging behaviour: current knowledge and research gaps. Eingereicht bei "Agriculture, Ecosystems & Environment", Juni 2025.
- Lammers D., Grimm V., Requier F., Focks A, Groeneveld J. Towards using the BEEHAVE honey bee model across climates: a heuristic approach to let egg-laying rates emerge from weather conditions, pollen storage and brood pheromones. *Ecological Modelling*. Eingereicht April 2024, Revision Juni 2025.

In Vorbereitung:

- Groeneveld J, Requier F, Becher M, Wang M, Grimm V. The integrative honey bee colony model BEEHAVE: lessons learned and to be learned. (unveröffentlichtes Manuskript).
- Wang M., Tausch F., Schmidt K., Diehl M., Knaebe S., Bargen H., Faramarzi F., Grimm V. Insight from using the BEEHAVE model to mimick stress experiments with honey bee colonies. (unveröffentlichtes Manuskript)

### 2.1.2 Vorträge

- Möglichkeiten des visuellen Bestäubermonitoring (Tagung der Bieneninstitute 22)
- The integrative honeybee colony model BEEHAVE: lessons learned (SETAC Europe 22)
- How can an automatic flighty activity monitor contribute to influence our understanding of risk for pollinators? (SETAC North America 22)
- Honey bee lifecycle assessment and homing success in field observations with the help of visual bee monitoring technology (ICPPR 22)
- Determination of repellency effects on honey bees & studying pollen and nectar collection behaviour under semi-field conditions, Germany 2022 (ICPPR 22)
- Bewertung des Lebenszyklus von Honigbienen anhand von Feldbeobachtungen mittels visuellem Monitoring (EuroBee 2023)
- From in silico to in vivo: understanding honeybee foraging under pesticide exposure, Tallinn 2024 (EURBEE September 2024 16-19)
- AI-Powered Field Monitoring with Modelling: Uncovering the Hidden Impacts of Sublethal Neonicotinoids on Bees (ICPPR 24)
- Survival Analysis of Marked Honey Bees Using Re-Identification: Insights from two Studies (ICPPR 24)
- Digital Farming Conference in Berlin, Panel Diskussion „Algorithmus schlägt Bauernregel – wie

digital ist die Zukunft der Landwirtschaft“ with Dr. Ophelia Nick, 17.05.2022. [Video](#)

- Honigbienen am Computer simuliert... Geht das überhaupt und warum?“, 7.11.2023, Bremer Imkerverein, Bremen
- Vorstellung der Projekterkenntnisse beim gemeinsamen Beenovation Abschluss am 17.10.2024 in Berlin mit 3 thematisch abgegrenzten Vorträgen zu den zentralen Projektergebnissen.
  - KI-basiertes Monitoring im BEEHAVE-Modell nachgestellt: neue Erkenntnisse über den Einfluss von Neonikotinoiden auf die Honigbiene
  - Zuordnung der Bienenaktivität zu Umweltfaktoren
  - Möglichkeiten des KI-basierten Bienenmonitorings für den Schutz von Honigbienen und weiteren Bestäuberinsekten.
- “Bienenbasiertes Biomonitoring zur Erschließung der synergetischen Wirkmechanismen von Landwirtschaft und Bestäuberinsekten“, Innovationstage 2024 (BLE), Berlin
- Vorstellung der Echtzeit und Farbanalyse als zukünftige Möglichkeit im Rahmen einer eigenen Webinar-Reihe 5 Terminen im Winter 2021/22 und internationalem Fachpublikum als vorwettbewerbliche Aktivität zur Gewährleistung der zeitnahen und nachhaltigen praktischen Nutzung der Projektergebnisse

### **2.1.3 Poster für wissenschaftliche Konferenzen**

- Measuring the quality of pollinator habitats and the effectiveness of measures to increase feed availability (Tagung der Bieneninstitute 22)
- Honey bee lifecycle assessment and homing success in field observations with the help of visual bee monitoring technology (SETAC Europe 22)
- GLP requirements for using visual bee monitoring technology in ecotoxicological studies (ICPPR 22)
- Eurofins Comparison of Dead Bee Traps for Honey Bees (ICPPR 22)
- Evaluation of bee counters a new protocol for measuring the accuracy of daily losses (ICPPR 22)

### **2.1.4 Abschlussarbeiten**

- Mielke, Vincent „Vorhersage der Aktivität von Bestäuberinsekten anhand von Umweltfaktoren“, Bachelor-Thesis Hochschule Karlsruhe, 2022.
- Hartmann, Thomas „Entwicklung eines Systems zur Beobachtung und Bewertung von Hummelvölkern, Master-Thesis KIT Karlsruhe, 2022.
- Lammers, Dominik, Masterarbeit, Universität Osnabrück, “Implementierung neuer Pollen- und Eierlege-Module und Analyse des Einflusses auf die simulierte Dynamik der Bienenkolonie im BEEHAVE-Modell”
- Luttermann, Max “Advancing the application of a bumblebee simulation model to the national scale”. Master-Thesis, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, 2024

- Wagner, Jan „Automatisierte Erfassung der lokalen, floralen Diversität mittels Computer Vision, Master-Thesis KIT Karlsruhe, 2022.
- Hermann, Marius „Vorhersage und Mustererkennung der Aktivität von Apis Mellifera anhand von Umweltfaktoren“, 2023.
- Slobodyanik, Anastasia „Multitask Self-Training for Detection of Honeybees and their Attributes“, 2023.

### 2.1.5 Öffentlichkeitsarbeit

- “Science Release” Pressemeldung der American Chemical Society anlässlich der Veröffentlichung des Papers “Reduced Honeybee Pollen Foraging under Neonicotinoid Exposure: Exploring Reproducible Individual and Colony Level Effects in the Field Using AI and Simulation” von Wang et. al. im März 2025. Abrufbar unter: <https://www.acs.org/pressroom/presspacs/2025/april/simulations-predict-how-pesticides-may-affect-honeybee-colonies.html> ab dem 17.05.2025.
- Pressemitteilung zu den Projektergebnissen von Disy. Veröffentlicht am 10.03.2025 auf der disy Website, abrufbar unter <https://www.disy.net/de/unternehmen/presse/pm-ki-gestuetzte-analyseder-bienenaktivitaet/>
- Disy-Newsletter-Beitrag „KI-gestützte Analysen: Welche Umweltfaktoren die Bienenaktivität beeinflussen“, veröffentlicht auf der Disy-Homepage am 11.03.2025, abrufbar unter <https://www.disy.net/de/beitraege/ki-gestuetzte-analysen-zur-bienenaktivitaet/>
- Pressemitteilung zur BEENOVATION Abschlussveranstaltung vom 18.10.2024, abrufbar unter <https://www.beenovation.de/post/pressemitteilung-abschlussveranstaltung-der-vernetzungs-und-transferma%C3%9Fnahme-beenovation>.
- Beenovation Podcast Beiträge von Silvio Knaebe (Eurofins) und Katharina Schmidt (apic.ai) <https://www.beenovation.de/post/beenovation-jetzt-summt-s-auch-auf-den-ohren>
- Beitrag in Financial Times Podcast Episode „The future of AI in Sustainability“ <https://shows.acast.com/the-next-five/episodes/the-future-of-ai-in-sustainability>. 28.11.2023
- Image video des Landes Baden-Württemberg mit Besuch eines der OCELI Studienorte. 17.11.2022. <https://www.thelaend.de/unternehmensprofil-apicai/>
- Wirtschaftsmagazin der IHK November 2022
- 37° Leben TV Reportage, Bewusstes imkern mit dem Besuch eines der OCELI Studienorte, 14.10.2022. <https://www.zdf.de/dokumentation/37-grad-leben/anders-ackern---bewusst-imkern-102.html>
- Beitrag auf der Seite von Soll-Galabau 04.10.2022. [Link](#).
- Pressemitteilung disy, „Mit Geodatenanalysen dem Bienensterben auf der Spur“, veröffentlicht auf der Disy-Homepage 21.09.2022, abrufbar unter <https://www.disy.net/de/unternehmen/presse/mit-geodatenanalysen-dem-bienensterben-auf-der-spur/>.

- Beitrag auf der Seite Geobranchen.de 22.09.2022, abrufbar unter <https://www.geobranchen.de/mediathek/geonews/item/mit-geodatenanalysen-dem-bienensterben-auf-der-spur>.
- Beitrag auf der Seite von VDV-Online 22.09.2022., abrufbar unter <https://www.vdv-online.de/aktuelles/vdvaktuell/mit-geodatenanalysen-dem-bienensterben-auf-der-spur.html>.
- Vodafone Blog Beitrag und Pressemitteilung, Bericht über Vodafone's Unterstützung von apic.ai und die Freigabe ihrer Daten für die OCELI Forschung. 27.08.2022, abrufbar unter <https://newsroom.vodafone.de/gigabeeprotect-iot-ki-fuer-bienchen-und-bluemchen>.
- Der Spiegel online & magazine, OCELI and apic.ai. 20.06.2022.
- Deutsches Bienenjournal, Nennung von apic.ai's Präsentation bei der Tagung deutscher Bieneninstitute. 01.05.2022
- Land in Form Magazin, Report über Katharina Schmidt, apic.ai und OCELI Anwendungen in der Landwirtschaft. 01.03.2022
- Gemeinsame Pressemitteilung zur Vorstellung des OCELI Projektes. Veröffentlichung u.a. über die FZI Website am 21.02.2022, abrufbar unter <https://www.fzi.de/wp-content/uploads/2021/07/dokupresse-oceli.pdf>.

### 3. Arbeitspakete und Meilensteine UFZ

#### 3.1 Umsetzung der Arbeitspakete

##### 3.1.1 Spezifikation der Gesamtlösung (AP1)

AP1 wurde von allen Projektpartnern gleichermaßen mitgestaltet. Das FZI als Konsortialführer übernahm zusätzlich die Moderation und Zusammenfassung der Ergebnisse. Allgemein wurden folgende Punkte abgedeckt und in einem agilen Lastenund Pflichtenheft festgehalten. Die Identifikation und Konsolidierung von Anwendungsszenarien in der Landwirtschaft auf wirtschaftlicher und wissenschaftlicher Ebene, zum Beispiel durch Homing-Studien. Zudem wurde die gemeinsame Definition wissenschaftlicher Studiensetups zum Test der notwendigen Funktionalitäten vorgenommen. Die Partner stellten gemeinsam Hypothesen über Wirkmechanismen zwischen Bestäubern und den Stressoren in ihrer Umgebung auf, die sich im Rahmen von Fallstudien überprüfen lassen. Erste Erfahrungen für ein technisches Konzept wurden gesammelt. Außerdem wurden Herausforderungen identifiziert, die mit der Implementierung des OCELI Systems zu lösen sein werden.

##### 3.1.2 Geodatenanalyse und Flächenbewertung (AP3)

Apic.ai wurde in die Nutzung des Modells BEEHAVE eingeführt, um eine Landschaftsbewertung hinsichtlich der Nektarund Pollenverfügbarkeit durchführen zu können. Hierfür wurde der Bedarf eines typischen Bienenvolkes, der mittels BEEHAVE quantifiziert wurde, mit dem Angebot in der Landschaft verglichen.

Disy wurde vom UFZ über die Landnutzungsdaten informiert, die das Modell BEEHAVE benötigt. Dies

sind die Lage, Form und Größe der landwirtschaftlich genutzten Flächen sowie wie Hauptackerfrucht die auf den Flächen in einem Jahr angebaut wird bzw. wurde. Disy entwickelte daraufhin mittels seiner Software Cadenza eine entsprechende Anwendung, die aber für die Fallstudien, für die BEEHAVE zum Einsatz kam, nicht benötigt wurde, weil dort andere Faktoren im Vordergrund standen. Die Disy-Anwendung erlaubt es Flächen zu identifizieren, in der nach Massentrachten wie z.B. Raps oder Linde Trachtlücken auftreten können, was die Honigbienenvölker deutlich schwächen könnte.

### 3.1.3 Ökologische Systemanalyse (AP4 Leitung UFZ)

Die Rolle des UFZ bestand darin, mittels des Modells BEEHAVE kurzzeitige Effekte, die sich mit dem KI-basierten Kamerasystem erfassen lassen, auf Langzeiteffekte zu extrapolieren.

#### Abbildung der Messwerte der empirischen Fallstudien im Modell<sup>7</sup>

In einer sog. Oomen-Studie wurde Bienenvölkern mittels einer „Feeder“ im Bienenstock eine Zuckerlösung angeboten, die eine subletale Konzentration eines Insektizides enthält (das Neonicotinoid Imidacloprid). Die Flugaktivität der Völker wurde mittels des apic.ai Gesamtsystems erfasst, wobei bei den einfliegenden Bienen zwischen Bienen mit oder ohne Pollenhöschen unterschieden werden konnte. Man kann annehmen, dass die meisten Sammelbienen, die ohne Pollenhöschen zurückkehren, Nektar gesammelt haben. Die Aktivität wurde auch vor und nach der mehrere Tage dauernden Exposition mit Imidacloprid erfasst.

Es zeigte sich, dass das Insektizid keinen Einfluss auf die Aktivität der Nektarsammlerinnen hatte, während die Zahl der Pollensammlerinnen deutlich zurück ging, wie in der folgenden Abbildung zu sehen (aus Wang et al. 2024<sup>8</sup>; FC: Kontrolle, FT: Exposition):

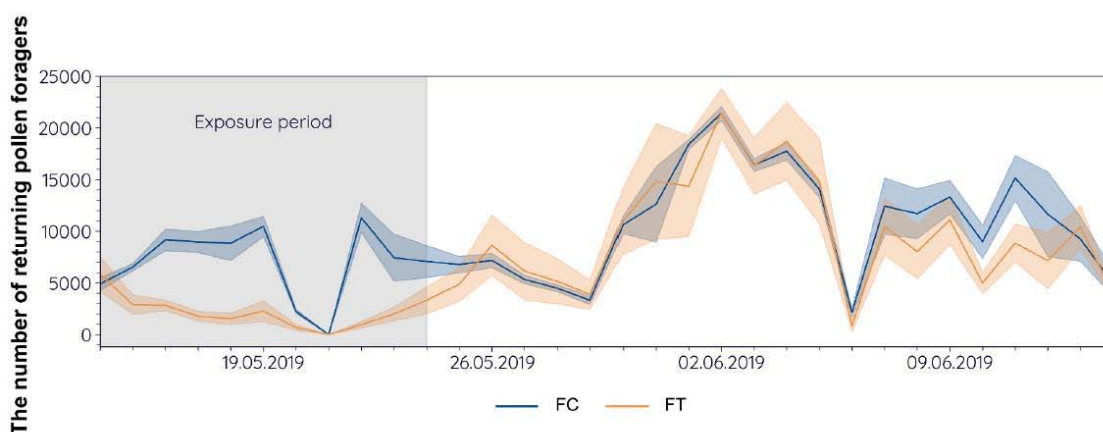


Fig. 2. The dynamics of daily changes in the number of returning pollen foragers in FC and FT between 14 May 2019 and 14 June 2019. The dynamic is presented by pooled mean (line)  $\pm$  pooled SD (shade) (n = 4).

Im Modell BEEHAVE gibt es verschiedenen Parameter, mit der die Aktivität der Pollensammlerinnen verändert werden kann. Es zeigte sich, dass nur eine Erhöhung der sog. „handling time“, d.h. der Zeit, die

<sup>7</sup> Die Zwischenüberschriften sind die entsprechenden „Methoden und Ergebnisse“ aus dem Antrag, AP4.

<sup>8</sup> Wang M, Tausch F, Schmidt K, Diehl M, Knaebe S, Bargen H, Materne L, Groeneveld J, Grimm V. 2024. Honeybee pollen but not nectar foraging greatly reduced by neonicotinoids: insights from AI and simulation. *Computers and Electronics in Agriculture* 121: 108966.

die Bienen brauchen um einen Sammelflug erfolgreich abzuschließen, zu Ergebnissen führt, die mit den empirischen Befunden übereinstimmen. Es musste eine zehnfach erhöhte handling time angenommen werden um die Effekte im Experiment zu reproduzieren.

Für die Reproduktion im Modell wurden Wetterdaten aus der entsprechende Region und für die Versuchsdauer verwendet, aber auf eine detaillierte Abbildung der Blühangebote in der Landschaft wurde verzichtet. Stattdessen wurde je eine generische Frühjahrs- und Sommertracht angenommen. Durch Kalibrierung eines einzigen Modellparameters, der handling-time, wurde ein überraschend gute Übereinstimmung von Messdaten und Modellergebnissen erreicht.

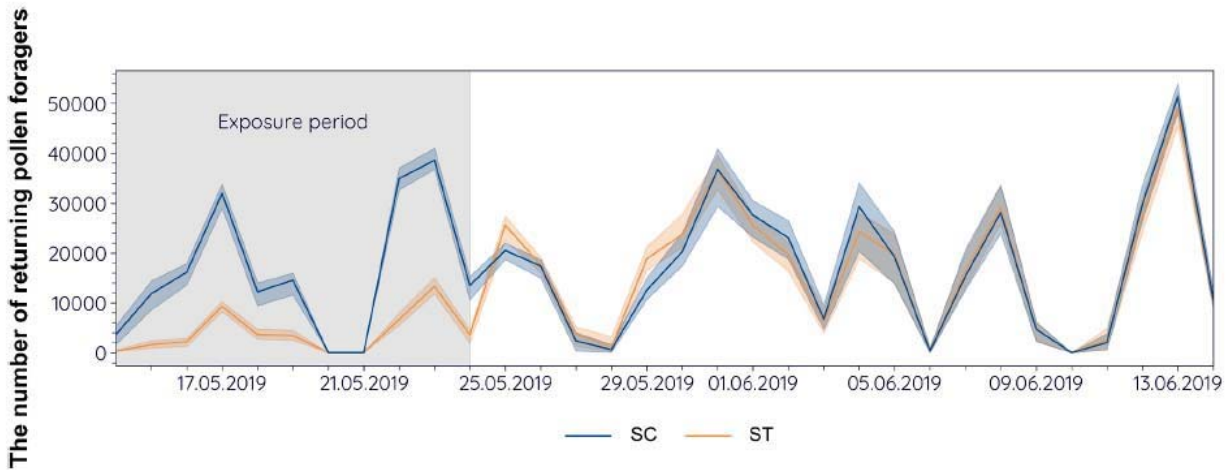
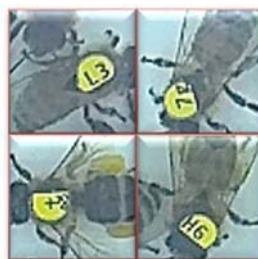


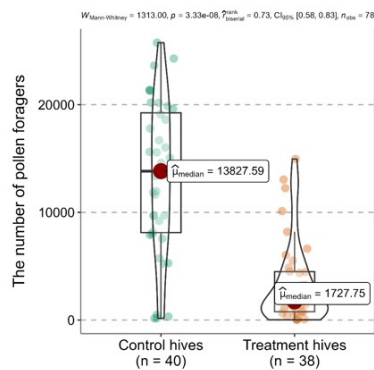
Fig. 4. The dynamics of daily changes in the number of simulated returning pollen foragers in SC and ST (i.e. TIME\_POLLEN\_GATHERING = 6000 and POLLEN\_DANCE\_FOLLOWERS = 2) between 14 May 2019 and 14 June 2019. The dynamic is presented by median (line) with interquartile range (shade) (n = 100).

Diese Erhöhung der handling time macht das Pollensammeln deutlich weniger effektiv, was zusammen mit anderen Stressoren die Resilienz eines Bienenvolkes schwächen kann. Gleichwohl ist die Erhöhung zunächst nur eine Modellvorhersage, die es zu prüfen gilt, denn das Modell ist trotz seiner Komplexität eine stark vereinfachte Darstellung der Realität.

Es wurde daher das ursprüngliche Experiment wiederholt, aber diesmal wurden zusätzlich mehrere Hundert Sammelbienen mittels kleiner nummerierter Plättchen markiert, die sich mit dem apic.ai System identifizieren ließen:



Auf diese Weise konnte die sog. „trip duration“, und somit die handling time gemessen werden. Der oben gezeigte Effekt des Neonikotinoids auf das Sammelverhalten konnte reproduziert werden. Auch der Effekt auf die handling time wurde beobachtet, aber statt einer Erhöhung um das Zehnfache war sie während der Exposition um das dreifache erhöht, wie die folgende Abbildung zeigt (aus Wang et al. 2025):



- Jeder Punkt steht für die Anzahl der zurückkehrenden Sammlerinnen pro Volk und Tag in den Kontroll- oder Behandlungsstöcken
- Signifikanter Unterschied

Ein derartiges Zusammenspiel von KI-basierten Daten aus dem apic.ai System, einem ökotoxikologischem Experiment, und Analysen mittels eines realistischen Modells, hat es bisher für Bienen nicht gegeben, und ist auch generell etwas Einzigartiges. Die Reproduzierbarkeit der Effekte und die Quantifizierung der subletalen Effekte des Neonikotinoids auf das Pollensammelverhalten eröffnet die Möglichkeit, regulatorische Pestizid-Risikobewertungen an freilebenden Honigbienen durchzuführen.

Die Studie von Wang et al. (2025) erschien in „Environmental Science and Technology“, einem hochrangigem Journal der American Chemical Society (ACS). Diese war von unseren Ergebnissen so beeindruckt, dass sie hierüber eine [Pressemittlung](#) veröffentlichte. Dies unterstreicht den hohen Stellenwert dieser Studien, an der neben dem UFZ die Partner apic.ai, FZI und Eurofins beteiligt waren.

*Integration von Fernerkundungsdaten und der Ergebnisse von Pollenanalysen. Entwicklung eines Pollenkennungs-Moduls, das es erlaubt, nicht nur die Menge, sondern auch die Zusammensetzung des Pollens und die entsprechenden Auswirkungen zu berücksichtigen.*

Im Laufe des Projektes zeigte sich, vor allem durch Ergebnisse des BLE-Projekte VIBEE, an dem die OCELI-Partner UFZ und Eurofins beteiligt waren, dass die Details des Blühangebotes in der Regel keinen entscheidenden Einfluss auf die Ergebnisse habe. Die generische Annahme einer Frühjahrsund Sommertracht, die jeweils mit einer Glockenkurve bzgl. Nektarund Pollenangebot in der Landschaft beschrieben werden, reicht in der Regel aus, da das Wetter eine größere Rolle spielt (s. auch die oben beschriebenen Ergebnisse, die ohne Landnutzungsdaten auskamen). Deshalb wurde dieser Weg nicht weiter verfolgt, außer in der von apic.ai durchgeführten Studie zum Pollenbedarf und Pollenangebot in einer Landschaft. Auch dort wurde in BEEHAVE das generische Landschaftsszenario angenommen, und der Pollenund Nektarverbrauch der realen Bienen gemessen: Pollen über das apic.ai System, Nektarverbrauch über Stockwaagen.

In BEEHAVE wird nur die Menge des gesammelten und gespeicherten Pollens berücksichtigt, aber in der Realität bevorzugen Bienen frischen Pollen für die Fütterung der Larven und der Königin. Es wurde aber auf eine Darstellung des Alters des gesammelten Pollens verzichtet, weil sich in einer Masterarbeit zeigte, dass dies unter realen Bedingungen keinen Einfluss hatte (Lammers et al., eingereicht). Um die Pollenvielfalt und -qualität zu berücksichtigen, fehlen die entsprechenden Daten. Das apic.ai System kann zwar über die Farbe des Pollens einige Haupttrachtpflanzen identifizieren, aber der Pollen vieler verschiedener Pflanzen hat eine zu ähnliche Farbe. Pollenfallen liefern zwar genauerer Daten, aber

immer nur Schnappschüsse, da diese Fallen immer nur für kurze Zeit verwendet werden können. Für eine Beurteilung der physiologischen Effekte verschiedener Pollenarten fehlen die empirischen Daten generell.

In der Studie von Lammers et al. (eingereicht) wurde allerdings eine weitere wichtige und im Antrag nicht antizipierte Rolle des Pollens untersucht: der Polleneintrag triggert die Eiablage der Königin. Wird sie nicht von den Arbeiterinnen mit Pollen gefüttert, stellt sie die Eiablage ein. Wir versuchten deshalb, ausgehend vom Polleneintrag ein BEEHAVE-Modul zu erstellen, in dem der saisonale Verlauf der Eiablage nicht vorgegeben wird, sondern sich letztlich aus dem Wetter und dem Blüh- bzw. Pollenangebot ergibt. Es stellte sich heraus, dass zusätzlich angenommen werden musste, dass die Intensität des Pollensammelns eines Bienenvolkes auch von der Größe der Brut abhängt, gesteuert durch Brutpheromone, die die Brut erwiesenermaßen abgibt. Letztlich ist diese Studie eher ein Denkanstoß als ein für sich bereits verwertbares Ergebnis, aber die vorgegebene Eiablagelagerate in BEEHAVE schränkt die Einsatzmöglichkeit von BEEHAVE stark ein, so dass es lohnenswert ist, nach Alternativen zu suchen.

*Multifaktoranalyse der Ursachen erhöhter Sterblichkeit und schwacher Volksentwicklung; Faktoren: Landschaftsstruktur, Futterangebot, Wetter, Pestizidausbringung, Krankheiten und imkerliche Praktiken.*

Der Aufwand für die oben beschriebenen Analysen der Oomen-Studien, die zu den beiden genannten Publikationen führte (Wang et al. 2024, 2025) war so hoch, dass eine systematische Multifaktoranalyse nicht möglich war. Sie wäre auch angesichts der vielfach fehlenden Daten nicht für alle Stressoren möglich gewesen. Eine Fokussierung auf empirisch machbare Studien erschien sinnvoll. Hypothetische Multifaktorenanalysen existieren bereits (Henry et al. 2017<sup>9</sup>, Rumkee et al. 2015<sup>10</sup>). Eine empirisch unterlegte Multifaktorenanalyse gibt es bisher nicht, weil eine systematische Variation der Stressfaktoren nur in einer großen Langzeitstudie durchzuführen wäre.

*Ableitung von Stressexperimenten und entsprechenden Vorhersagen, die in der zweiten Saison in Fallstudien implementiert und getestet werden können.*

Es ist bekannt, dass die Merkmalsvariation bei Bienenvölkern extrem hoch ist. Während sie im Tierreich oft bei ca. 30% liegt, kann sie bei Bienenvölkern zwei Größenordnungen größer sein. Es wird dies auch immer wieder von Imkern berichtet, z.B. dass von 10 Völkern, die an einem Rapsfeld aufgestellt sind, ein oder zwei Völker nicht in der Raps gehen. Diese Variabilität geht stark auf die Variabilität der Königinnen zurück und mit welchen Drohnen sie sich gepaart haben, aber auch auf die Struktur und Geschichte eines Bienenvolkes.

Es ist deshalb nicht erstaunlich, dass die ersten Stressexperimente, die durchgeführt wurden, keine Ergebnisse lieferten, die klar genug gewesen wären, um im Modell nachgespielt zu werden. In diesen Experimenten wurden entweder an einem Tag die Flugbienen entfernt, oder die Brut entnommen. Die

---

<sup>9</sup> Henry M, Becher MA, Osborne J, Kennedy P, Aupinel P, Bretagnolle V, Brun F, Grimm V, Horn J, Requier F. 2017. Predictive systems models can help elucidate bee declines driven by multiple combined stressors. *Apidologie* 48: 328–339.

<sup>10</sup> Rumkee JC, Becher MA, Thorbek P, Kennedy PJ, Osborne JL 2015. Predicting honeybee colony failure: Using the BEEHAVE model to simulate colony responses to pesticides. *Environmental Science & Technology*, 49(21), 12879-12887.

Experimente wurden wiederholt und lieferten diesmal für einige Völker klare Ergebnisse. Es wurden Flugaktivitäten aufgenommen sowie die sog. Volksentwicklung, d.h. geschätzte Werte der Brutentwicklung und Volksgröße. Diese Stressexperimente wurden mittels BEEHAVE nachgestellt. Die Volksentwicklung wurde weitgehend reproduziert, während es bei der Flugaktivität teilweise deutliche Unterschiede in der Antwort auf den Stress gab (Wang et al., in Vorbereitung). Die Ergebnisse bestätigen zum einen, dass BEEHAVE Grundmechanismen der Volksentwicklung richtig wiedergeben kann, aber die Daten zur Flugaktivität waren aufgrund der geringen Anzahl an Wiederholungen (je vier Kontroll- und Behandlungsvölker) zu variabel, um weitere Einsichten zu erlangen.

*Interpretation dessen, wie sich bestimmte Landwirtschaftsstrukturen auf die lokalen Lebensbedingungen von Bestäuberinsekten auswirken. Dies ist die Basis, um Empfehlungen für Verbesserungen zu entwickeln.*

Wie bereits weiter oben erwähnt, wurde der Aspekt der Landschaftsstrukturen nicht im Detail verfolgt, weil er einen geringeren Einfluss hat auf das Überleben der Honigbiene als z.B. das Wetter (schlechtes Wetter während der Massentrachten im Frühjahr und Sommer, zu frühes warmes Wetter, usw.). Auch ist bekannt, dass mangelhafte Kontrolle der Varroa-Milbe für mindestens ein Viertel der Bienenvolkverluste im Winter verantwortlich ist.

*Erstellung eines "Workflows" (Skripte, Datenschnittstellen, Handbücher) zur Nutzung von BEEHAVE im Rahmen von OCELL.*

Die BEEHAVE-basierten Publikationen enthalten die entsprechenden Informationen. Ein separates Handbuch für die Nutzung von BEEHAVE erschien nicht notwendig, da BEEHAVE ausführlich dokumentiert ist und ein „User Manual“ bereitstellt. Das neue Handbuch war für landschaftsbezogene Analysen gedacht, auf die aus den o.g. Gründen verzichtet wurde.

*Erste datengetriebene Anwendung von Bumble-BEEHAVE*

Aufgrund des hohen technischen Aufwandes der erforderlich ist, das apic.ai System zuverlässig und reproduzierbar Daten liefern zu lassen, wurde nach Pilotstudien auf eine Erfassung der Flugaktivität von Hummelvölkern verzichtet. Gleichzeitig fehlen hochauflösende Daten zu den Nestern der Hummelarten, sowie zu ihrer Populationsgröße. Eine weitere Limitation konnte allerdings behoben werden: das Bumble-BEEHAVE-Modell verlangt, dass für alle relevanten Blühpflanzenarten die Tiefe der Blütenkrone bzw. -corolla angegeben wird, da die verschiedenen Hummelarten, die das Modell darstellt, verschiedene Corolla-Tiefen bevorzugen bzw. benötigen. Zur Corolla-Tiefe gibt es aber nur wenig Daten. In einer veröffentlichten Masterarbeit (Luttermann et al., 2025) wurde deshalb eine generische Parametrisierung eingeführt, die es erlaubt auf die Parametrierung der Blühpflanzen, die in BEEHAVE verwendet wird, zurückzugreifen.

### 3.1.4 Fallstudien (AP6)

UFZ war an folgenden Fallstudien beteiligt:

- Beurteilung des Nektar- und Pollenangebotes in der Landschaft, verglichen mit den von BEEHAVE vorhergesagtem Bedarf in einer Landschaft, in der das Nahrungsangebot nicht limitiert ist. Die

Studie wurde von apic.ai durchgeführt.

- Nachbildung des Fütterungsexperiments ("Oomen-Studie"), in dem der Einfluss eines Neonicotinoids auf das Flugverhalten der Sammelbienen erfasst wurde (Wang et al. 2024<sup>11</sup>).
- Modellgestützte Ableitung eines wiederholten Fütterungsexperiments, in dem zusätzlich Hunderte Bienen individual markiert wurden (Wang et al. 2025<sup>12</sup>).
- Modellgestützte Ableitung von Stressexperimenten in denen entweder die gesamte Brut oder die Flugbienen entfernt wurden und die Reaktion im Flugverhalten und der Volksentwicklung beobachtet wurden.

### 3.1.6 Ergebnisverbreitung und -verwertung und Koordination (AP7)

Das Modell BEEHAVE spielte bei der Ergebnisverwertung und -verbreitung eine entscheidende Rolle, da es die Möglichkeit bot, aus den Ergebnissen des Fütterungsexperiments in eine überprüfbare Hypothese abzuleiten, die dann erfolgreich getestet wurde. Somit war es möglich, das Potential der Gesamtlösung des Projektes, insbesondere das KI-basierte Kamerasystem, mittels hochrangiger Publikationen zu dokumentieren, was zu einer Auszeichnung von Wang et al. (2025) durch American Chemical Society mittels einer Pressemitteilung führt (s.. Punkt 2.2).

## 3.2 Vergleich zu den ursprünglichen Zielen (Zielabweichungen begründen)

Der Einsatz von BEEHAVE fokussierte auf die Fütterungsstudien und Stressexperimente, was im Einklang mit den Projektzielen war. Auf eine Berücksichtigung der Geodaten (Nahrungsangebot in der Landschaft) wurde bei diesen Anwendungen verzichtet, da bereits die Grundeinstellung von BEEHAVE, in der je eine generische Frühjahrsund Sommertracht angenommen wird bei denen es zu keinen Nahrungslimitierungen durch die Blühpflanzen kommt, zu einer sehr guten Übereinstimmung mit den Daten aus dem Fütterungsexperiment führten. Außerdem konzentrierte sich Disy auf die statistische Auswertung des Zusammenhangs zwischen Geodaten und Flugverhalten sowie Nahrungseintrag (s. Abb. J).

Bei den Stressexperimenten wurde ebenfalls auf eine Einbeziehung der Geodaten verzichtet, ebenso auf eine Veröffentlichung der modellgestützten Analyse der Daten aus diesen Experimenten, da die Variabilität der "Wiederholungen", d.h. zwischen den Reaktionen der Bienenvölker die am selben Standort demselben Stress ausgesetzt waren, zu hoch war um generelle Rückschlüsse zu ziehen. Die hohe Merkmalsvariabilität der Honigbienenvölker wurde bereits erwähnt. Ermutigt durch die überraschende Reproduzierbarkeit der Fütterungsstudie hat OCELI trotzdem zweimal versucht, unter Freilandbedingungen belastbare Ergebnisse zu erzielen, denn ähnlich wie der Stress durch das Pestizid in der Fütterungsstudie hätte man erwarten können, dass unter Stress die Variabilität abnimmt, aber das

---

<sup>11</sup> Wang M, Tausch F, Schmidt K, Diehl M, Knaebe S, Barga H, Materne L, Groeneveld J, Grimm V. 2024. Honeybee pollen but not nectar foraging greatly reduced by neonicotinoids: insights from AI and simulation. *Computers and Electronics in Agriculture* 121: 108966.

<sup>12</sup> Wang M, Tausch F, Schmidt K, Diehl M, Knaebe S, Barga H, Faramarzi F, Grimm V. 2025. Reduced honeybee pollen foraging under neonicotinoid exposure: exploring reproducible individual and colony level effects in the field using AI and simulation. *Environmental Science and Technology* 59, 4883–4892.

war nicht der Fall. Obwohl in der Wissenschaft negative Ergebnisse, d.h. man erhält nicht das, was man erwartet, in der Regel nicht publiziert werden, besteht die Absicht dieses Negativergebnis nachträglich zu publizieren. Unterstützt wird unsere Sichtweise durch eine Studie, die untersuchte mit wie vielen Völkern man arbeiten müsste, und über welchem Zeitraum, um zu klären, ob Honigbienen Wildbienen negativ beeinflussen (Beaurepaire et al. 2025<sup>13</sup>). Die Studie kam zu dem Schluss, dass sich empirisch diese Frage nicht klären lässt.

Es war geplant, ein Pollenmodul für BEEHAVE zu erstellen, in dem nicht nur die Menge, sondern auch das Alter des eingetragenen Pollens berücksichtigt wird, und auch die Pflanzenart, von der der Pollen stammt. Es zeigte sich aber in einer Masterarbeit (Dominik Lammers, Universität Münster), dass das Pollenalter auch unter der Annahme, dass Honigbienen frischen Pollen bevorzugt an Larven und Königin verfüttern, keinen Einfluss auf die Ergebnisse hatte. Auch stellte sich im Projektverlauf heraus, dass die Artbestimmung des Pollens anhand der vom Kamerasystem erfassten Pollenfarbe nicht genau genug ist, um genügend viele Arten sicher zu bestimmen. Außer der Farbe und Größe spielt bei der Pollenbestimmung auch die Form und Oberflächenbeschaffenheit des Pollens eine Rolle, die aber vom Kamerasystem nicht erfasst werden können, da die Pollen nicht einzeln erfasst werden können, sondern nur in den Pollenhöschchen.

### *3.2.1 Erreichung der Meilensteine*

*M1: Anforderungsanalyse, unspezifische Datenerhebung sowie Aufbau eines Basissystems – Projektmonat 5*

Die Betriebsweise und die Datenanforderungen für BEEHAVE wurden den Projektpartnern vorgestellt und dokumentiert. Austausch und Kooperation mit BLE-Projekt VIBEE wurde vereinbart, BEEHAVENutzer bei Bayer wurden über OCELL informiert.

*MS-2: Präsentation der ersten Ergebnisse auf einer Fachkonferenz Projektmonat 10*

Das Ziel wurde erreicht, s. Abschnitte 2.1.2, 2.1.3 und 2.2.

*MS-3: On-Device Prototyp ist einsatzbereit; Szenarien für Fallstudien wurden definiert – Projektmonat 14*

Der UFZ-Mitarbeiter für OCELL, der erst im vierten Projektmonat eingestellt werden konnte, hat sich in das Modell BEEHAVE eingearbeitet, das ca. 6000 Zeilen Programmcode und ein komplexes inneres Wechselwirkungsnetzwerk umfasst. Für die Einarbeitung in Modelle dieser Komplexitätsstufe wird in der Regel ein Zeitraum von ca. 6 Monaten angesetzt. Stressexperimente an realen Völkern wurden aufgrund von BEEHAVE-Simulationen diskutiert und definiert.

*MS-4: Demonstrator der Gesamtlösung ist einsatzbereit – Projektmonat 25*

Die erste Auswertung der oben genannten Oomen-Studie mittels BEEHAVE wurde erfolgreich durchgeführt. Darüber hinaus wurden vom UFZ die komplexen Daten, die von apic.ai System erfasst wurden, auf Vollständigkeit und Konsistenz überprüft und in Einzelfällen die Daten von apic.ai bereinigt.

---

<sup>13</sup> Beaurepaire AL et al. (2025): Trends in ecology & evolution, 40(1), 7-10.

Somit waren sowohl das apic.ai System also auch die Anbindung an BEEHAVE einsatzbereit. Die Stressexperimente wurden durchgeführt, aber die Ergebnisse waren aufgrund der hohen Merkmalsvariabilität von Bienenvölkern nicht für Simulationen verwertbar. Eine Wiederholung der Experiment, diesmal ohne Honigentnahme aber mit mehr Völkern wurde beschlossen. Trachtlücken wurden aufgrund der Fokussierung auf die Effekte von Pestiziden auf das Pollensammelverhalten nicht näher untersucht.

#### *MS-5: Projektabschluss und Abschlusspräsentation – Projektmonat 36*

Das hohe Potential der Gesamtlösung wurde vor allem durch die Arbeiten zum Effekt eines Neonicotinoids auf das Pollensammelverhalten bewiesen und Publikationen (Wang et al. 2024, 2025) dargestellt, sowie auf Konferenzen vorgetragen (Abschnitt 2.2), sowie auf der Abschlussveranstaltung von Beenovation sowie den Innovationstagen des BLE, beides in Berlin in 2024.

## **4. Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

Die Gesamtkosten von 346.603 € enthielten 307.447 € Personalkosten und 2.908,74 € Reisekosten, der übrige Betrag waren Verwaltungskosten. Die Gesamtkosten lagen unter der Gesamtvorkalkulation (355.232 €).

## **5. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten**

Das Modell BEEHAVE war notwendig, um die empirischen Ergebnisse zu interpretieren und somit wissenschaftlich verwertbar zu machen. Die in OCELI entwickelte Gesamtlösung ist ein Monitoringwerkzeug, aber Monitoringdaten allein stellen noch keinen Mehrwert da, es muss gezeigt werden, dass sie belastbare Einsichten erlauben. In OCELI war das die Aussage, dass die Gesamtlösung ein Werkzeug bereitstellt, das bei der Risikoanalyse von Pestiziden zum Einsatz kommen, und zwar unter Freilandbedingungen, was bisher nicht für möglich gehalten wurde. Die geleistete Arbeit war angemessen: sie erforderte aufwendiges Kuratieren der komplexen Daten aus dem KI-basiertem Kamerasystem, sowie aufwendige Simulationen und belastbare statistischer Auswertungen der Simulationsergebnisse.

## **6. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans**

Das Projekt OCELI liefert mit seiner entwickelten Plattform für das automatisierte Bestäubermonitoring eine technisch und wissenschaftlich anschlussfähige Grundlage für zahlreiche Anwendungsbereiche. Die energieautarke Kombination aus KI-basierter Bilderkennung, modularer Sensorik und ökologischer Modellintegration ermöglicht eine präzise, skalierbare Erfassung von Umweltwirkungen auf Bestäuberinsekten. Die erzielten Ergebnisse sind sowohl in der ökotoxikologischen Bewertung als auch

in der landwirtschaftlichen Praxis verwertbar und bieten hohes Potenzial für den Technologietransfer in Folgeprojekte, praxisorientierte Anwendungen sowie in wissenschaftliche Weiterentwicklungen im Bereich der Umweltund Agrarinformatik.

## **7. Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Im BLE-Projekt VIBEE (Laufzeit 03/2020 09/2023) wurden eingehende Studien durchgeführt die klären sollten, inwieweit eine hochauflösende Erfassung des Blühangebotes in der Landschaft möglich ist und ob sie erforderlich ist. Bei den Möglichkeiten wurde Luftbilder aus Drohnenflügen ausgewertet, außerdem wurden Transektbegehungen durchgeführt. In einer unveröffentlichten Praktikumsarbeit wurde gezeigt, dass selbst mit unrealistisch großem Aufwand sich das Blühangebot nicht in all seiner Vielfalt und Variabilität erfassen lässt. Es zeigte sich aber auch, dass die summarische Erfassung des Blühangebotes in der Grundeinstellung von BEEHAVE in den meisten Fällen ausreichend ist. Auch aus diesem Grund wurden bei den meisten BEEHAVE-Anwendungen die Geodaten nicht genutzt. VIBEE zeigte auch anhand sog. "robbers tests", in denen kontrolliert ein Bienenvolk eine leere Beute, in der Futter angeboten wird, "räubert", dass sich die Genauigkeit der Erfassung der Flugaktivität nicht auf 100% erhöhen lässt, was auch in OCELI bestätigt wurde.

## **8. Erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NKBF**

Neben öffentlichkeitswirksamen Darstellungen des Projekts fand eine Beteiligung an den wissenschaftlichen Publikationen der Partner statt. Genaue Details finden sich in Kapitel 2.