

# **10. Fachtagung BIOMET des Fachausschusses Biometeorologie der DMG e.V.**

vom 19. bis 21. März 2024  
in Offenbach am Main

Programm und Zusammenfassungen



Zitationsvorschlag:

Busch, Udo: 10. Fachtagung BIOMET des Fachausschusses Biometeorologie der DMG e.V.: 19. bis 21. März 2024 in Offenbach; Programm und Zusammenfassungen. - Offenbach am Main: Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, 2024, 138 S. (Annalen der Meteorologie; 53)

<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:101:1-2024031511490609425764>

Fachliche Redaktion und Mitarbeit Layout: Peggy Hofheinz, Tanja Netz, Susanne Schorlemmer

---

ISSN der Online-Ausgabe: 2194-5934

ISSN der Druckausgabe: 0072-4122

ISBN der Onlineausgabe: 978-3-88148-552-4

ISBN der Druckausgabe: 978-3-88148-552-1

---

Nutzungsbedingungen:

Dieses Band untersteht der Creative Commons-Lizenz CC BY4.0:



Sie dürfen das Werk bzw. den Inhalt unter folgenden Bedingungen vervielfältigen, verbreiten und öffentlich zugänglich machen: Sie müssen den Namen des Autors/Rechteinhabers in der von ihm festgelegten Weise nennen. Dieses Werk bzw. dieser Inhalt darf nicht für kommerzielle Zwecke verwendet werden und es darf nicht bearbeitet, abgewandelt oder in anderer Weise verändert werden. Mit der Verwendung dieses Dokumentes erkennen Sie die Nutzungsbedingungen an.

Die in den DWD-Berichten veröffentlichten Texte werden allein von ihren jeweiligen Autoren verantwortet; die darin zum Ausdruck gebrachte Meinung entspricht nicht notwendig der Meinung des Herausgebers (Deutscher Wetterdienst).

**Herausgeber und Verlag:**

Deutscher Wetterdienst  
Bildungszentrum Selbstverlag  
Am DFS\_Campus 4  
63225 Langen  
Internet: [www.dwd.de](http://www.dwd.de)  
Mail: [bildungszentrum@dwd.de](mailto:bildungszentrum@dwd.de)

**Anschrift des Autors:**

Dr. Udo Busch  
Deutscher Wetterdienst  
Abteilung Agrarmeteorologie  
Frankfurter Straße 135  
63067 Offenbach

## **Vorwort**

Der Fachausschuss Biometeorologie der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft e.V. setzt seine Tradition fort und veranstaltet vom 19. bis 21.3.2024 eine Fachtagung zur Fragestellung wie sich der fortschreitende Klimawandel auf unsere Umwelt und Lebensräume auswirken wird.

Der Kurztitel der Tagung lautet: „Lebensräume im Wandel“

Der Tagungsband zeigt eindrucksvoll, welchen Herausforderungen wir uns alle stellen müssen und was noch auf uns zukommen wird. In 41 Vorträgen und 8 Posterbeiträgen werden die neuesten Forschungsergebnisse und Entwicklungen vorgestellt und diskutiert.

**Die Schwerpunkte der Tagung sind:**

- Gesundheit in Zeiten des Klimawandels
- Städte im Klimawandel
- Landwirtschaft im Klimawandel
- Wälder im Klimawandel
- Phänologie

Ich freue mich sehr, dass sich mit der Zentrale des Deutschen Wetterdienstes in Offenbach ein Tagungsort präsentiert, der über eine weitreichende meteorologische Tradition verfügt.

Die Tagung wird auch vom Deutschen Wetterdienst unterstützt. Allen Mitwirkenden, die bei der Organisation und Durchführung der 10. Fachtagung BIOMET mitgeholfen haben, sei hier an dieser Stelle noch einmal herzlichst gedankt.

Udo Busch  
(Fachausschussvorsitzender DMG-BIOMET)

## **Inhaltsverzeichnis**

Organisationskomitee.....	5
Programmkomitee.....	5
Tagungsprogramm.....	6
1 Städte im Klimawandel.....	11
1.1 Vorträge.....	11
1.2 Poster.....	47
2 Landwirtschaft im Klimawandel.....	50
2.1 Vorträge.....	50
2.2 Poster.....	77
3 Phänologie – Indikator des Klimawandels.....	78
3.1 Vorträge.....	78
3.2 Poster.....	98
4 Gesundheit in Zeiten des Klimawandels.....	100
4.1 Vorträge.....	100
4.2 Poster.....	120
5 Wälder im Klimawandel.....	125
5.1 Vorträge.....	125
5.2 Poster.....	137
6 Liste der Moderatoren und Vortragenden.....	138
7 Annalen der Meteorologie.....	144

## **Organisationskomitee**

Udo Busch (Vorsitzender des FA BIOMET)  
Saskia Lifka (DWD, Abt. Agrarmeteorologie)  
Nielab Rahmani-Maywandi (DWD, Abt. Agrarmeteorologie)  
Anja Zeuschner (DWD, Abt. Agrarmeteorologie)

## **Programmkomitee**

### **Städte im Klimawandel**

Thomas Rötzer (TU München)  
Andreas Christen (Uni Freiburg)

### **Landwirtschaft im Klimawandel**

Uta Moderow (TU Dresden)  
Günther Schauburger (VetMed Uni Wien)

### **Phänologie – Indikator des Klimawandels**

Frank-M. Chmielewski (HU Berlin)  
Susanne Jochner-Oette (KU Eichstätt-Ingolstadt)

### **Gesundheit in Zeiten des Klimawandels**

Valeri Goldberg (TU Dresden)  
Birger Tinz (DWD, Abt. Klima und Umweltberatung Hamburg)

### **Wälder im Klimawandel**

Henning Meesenburg (Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt)  
Dirk Schindler (Uni Freiburg)

**Programm und Zusammenfassungen online verfügbar:**

<http://nbn-resolving.de/> urn:nbn:de:101:1-2024031511490609425764

## Tagungsprogramm

Dienstag, 19. März 2024

09.00 – 11.00	Anmeldung
11.00 – 11.30	Grußworte und Eröffnung der Fachtagung  Session I: Städte im Klimawandel
11.30 – 12.00	<b>Jürgen Baumüller</b> , Universität Stuttgart Einführungsvortrag Session I: Eine Stadt im Klimawandel – Stuttgart
12.00 – 13.00	Mittagspause
13.00 – 13.20	<b>Andrea Sofia García de León</b> , Universität Würzburg Variation der Landoberflächentemperatur städtischer Landnutzungs- klassen basierend auf der Baumbestandsverteilung: Ein fernerkundlicher Ansatz
13.20 – 13.40	<b>Sophie Arzberger</b> , TU München Einfluss der Vegetationsstruktur auf das Kühlungspotential von städtischen Grünflächen in München
13.40 – 14.00	<b>Eleonora Franceschi</b> , TU München Einfluss von Witterung und Klima auf die Wachstumsmuster wichtiger Stadtbaumarten
14.00 – 14.15	Pause
14.15 – 14.35	<b>Astrid Reischl</b> , TU München Saisonale Dynamik des Blattflächenindex (LAI) ausgewählter Baumarten in städtischer Umgebung
14.35 – 14.55	<b>Valeri Goldberg</b> , TU Dresden Wie stark „stören“ Stadtbäume nächtliche Kaltluftflüsse? Eine Modellstudie mit KLAM_21 für die Stadt Plauen.
14.55 – 15.15	<b>Denise Böhnke</b> , Karlsruher Institut für Technologie KIT Einblicke in die Herausforderungen kommunaler Klimaanpassung in der Bauleitplanung
15.15 – 14.45	Pause
15.45 – 16.05	<b>Ferdinand Briegel</b> , Universität Freiburg Downscaling von Klimaprojektionen zur Abschätzung der zukünftigen thermischen Belastung in Städten auf der Grundlage eines Deep-Learning- Ansatzes
16.05 – 16.25	<b>Astrid Ziemann</b> , TU Dresden In welchem Stadtquartier ist die Hitzebelastung geringer? - Modell- und Messergebnisse aus einem Erfurter Gründerzeitviertel und einem Dresdener Plattenbaugebiet

16.25 – 16.45	<b>Ronald Queck, TU Dresden</b> Darstellung von Bäumen in numerischen Simulationen und ihre Wirkung auf die thermische Behaglichkeit
16.45 – 17.05	<b>Mohammad Rahman, TU München</b> Outdoor human thermal comfort under contrasting tree species shade and climatic conditions
17.05 – 17.20	Pause
17.20 – 17.40	<b>Jonathan Simon, Universität Augsburg</b> Klima- und Gesundheitseffekte unterschiedlicher urbaner Waldstrukturen
17.40 – 18.00	<b>Matthias Sühling, pecanode GmbH, Universität Hannover</b> Mikroskalige Modellierung der erythemwirksamen UV-Bestrahlungsstärke in städtischen Umgebungen unter Verwendung des gebäudeauflösenden Stadtklimamodells PALM-4U
18.00 – 18.20	<b>Peter Hoffmann, Helmholtz-Zentrum Hereon, Hamburg</b> CoSynHealth – Entwicklung von Klimadienstleistungen für die zukünftige Stadtgesundheit auf der Grundlage eines Stadtansatzes
18.20 – 19.15	FA Sitzung BIOMET im Gartensaal
19.15	Icebreaker im DWD
<b>Mittwoch, 20. März 2024</b>	
08.00 – 08.30	Anmeldung  Session II: Landwirtschaft im Klimawandel
08.30 – 09.00	<b>Sabina Thaler, Universität für Bodenkultur Wien</b> Einführungsvortrag Session II: Application of climate change scenarios on selected pest algorithms in Austria
09.00 – 09.20	<b>Ali Yigit, HU Berlin</b> How to grow spring barley under warmer climate conditions in Germany?
09.20 – 09.40	<b>Denise Assmann, DWD Leipzig</b> N-Stabilisierung in der Düngepraxis: Optimierung durch Regionalisierung auf Basis meteorologisch-edaphischer Parameter – StaPrax-Regio
09.40 – 10.00	<b>Uwe Spank, TU Dresden</b> Müssen Treibhausgasemissionen und Verdunstungsraten über dem Freiwasserbereich ausgedehnter Wasserflächen neu bewertet werden?
10.00 – 10.15	Pause
10.15 – 10.35	<b>Günther Schauburger, Veterinärmedizinische Universität Wien</b> Einfluss der globalen Erwärmung auf die Haltung landwirtschaftlicher Nutztiere in Stallungen

- 10.35 – 10.55 **Falk Böttcher**, *DWD Leipzig*  
Das (neue) interimistische Bodenfeuchtemessnetz des Deutschen Wetterdienstes
- 10.55 – 11.15 **Thomas Leppelt**, *DWD Offenbach*  
Wie Klimavorhersagen der Bodenfeuchte der Land- und Forstwirtschaft nutzen können
- 11.15 – 11.30 Pause
- Session III: Phänologie – Indikator des Klimawandels
- 11.30 – 12.00 **Helfried Scheifinger**, *Geosphere Austria*  
Einführungsvortrag Session III:  
Phänologie in Österreich - Phänologie und Citizen Science seit 1851 und zur Visualisierung phänologischer Information
- 12.00 – 13.00 Mittagspause
- 13.00 – 13.20 **Susanne Jochner-Oette**, *KU Eichstätt-Ingolstadt*  
Das Netzwerk der Internationalen Phänologischen Gärten Europas – ein Update
- 13.20 – 13.40 **Thomas Hübner**, *Geosphere Austria*  
Kooperation mit Naturparks und Klimawandelanpassungsregionen für die Erhebung phänologischer Daten in Österreich
- 13.40 – 14.00 Pause
- 14.00 – 14.20 **Frank-M. Chmielewski**, *HU Berlin*  
Physiologische basierte Modellierung der Obstblüte am Beispiel der Süßkirsche
- 14.20 – 14.40 **Johanna Jetschni**, *KU Eichstätt-Ingolstadt*  
Die Bewertung des Allergierisikos städtischer Parks mittels Phänologie und Aerobiologie
- 14.40 – 15.00 **Daniel Doktor**, *Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung-UFZ*  
Fernerkundungsbasierte phänologische Trendschätzungen werden durch heterogene Landschaftsstrukturen beeinflusst – eine theoretische Simulationsanalyse
- 15.00 - 16.00 Postersession mit Kaffee
- Thomas Foken**, *Uni Bayreuth*  
Identifikation kleinräumiger lokaler Klimate in einem Crowdsourcing-Netzwerk
- Uta Moderow**, *TU Dresden*  
Quantifizierung der Wirksamkeit von Anpassungsmaßnahmen an der Hitze im Freiraum – eine Implementierung im HRC-Hitzetool
- Nadine Kaul**, *Uni Hamburg*  
Vegetation-water-interactions in the urban area of Hamburg – A spatially explicit remote sensing assessment

**Sabina Thaler**, *Uni Wien*  
The Agricultural Risk Information System (ARIS) for Austrian agriculture

**Nicole Kauke**, *LANUV*; **Johanna Lenz**, *HNLUG*; **Matthias Zimmer**, *LfU RLP*  
Standardisiertes phänologisches Monitoring von Klimaveränderungen

**Svenja Ludwig**, *DWD Freiburg*  
Projekt „KlimaGesund Baden-Württemberg“

**Kathrin Graw**, *DWD Freiburg*; **Felix Oberhardt** (*Uni Freiburg*)  
Niederfrequente Luftdruckschwankungen und Auswirkungen auf die Gesundheit des Menschen

**Henrike Lorenz**, *FU Berlin*  
Auswirkungen extremer Windgeschwindigkeiten und anderer Faktoren auf Baumsturz entlang von Bahnlinien

16.00 – 16.20 **Birgit Nordt**, *FU Berlin, Botanic Garden and Botanical Museum*  
Pflanze KlimaKultur! Einfluss des Stadtklimas auf die Phänologie von Pflanzen – ein Citizen Science-Ansatz

16.20 – 16.40 **Robert Rauschkolb**, *Deutsches Zentrum für Integrative Biodiversitätsforschung (iDiv) Halle-Jena-Leipzig*  
Räumliche Variabilität in der Phänologie von krautigen Arten wird größtenteils durch Temperatur, aber auch durch funktionelle Merkmale und die Lichtverfügbarkeit erklärt

16.40 – 17.00 **Rafael Posada**, *DWD Offenbach*  
Pflanzenmeldungen. Ein Crowd-Sourcing Ansatz als Ergänzung des stationären phänologischen Beobachtungsnetzes des DWD

19.00 Konferenz Dinner im Markthäuschen am Wilhelmsplatz

#### Donnerstag 21. März 2024

08.00 – 08.30 Anmeldung

Session IV: Gesundheit in Zeiten des Klimawandels

08.30 – 09.00 **Hans-Guido Mücke**, *UBA Berlin*  
Einführungsvortrag Session IV:  
Herausforderungen Klimawandel bedingter Hitzeextremereignisse – Ergebnisse einer ersten bundesweiten Studie zu Hitzeaktionsplänen

09.00 – 09.20 **Katharina Epp**, *Universität Freiburg*  
Thermische Belastung in Innenräumen des Universitätsklinikums Freiburg auf der Grundlage kontinuierlicher und verteilter Innenraummessungen im Sommer 2023

09.20 – 09.40 **Kathrin Graw**, *DWD Freiburg*  
Prävalenz von Wetterfühligkeit in Deutschland

09.40 – 09.55 Pause

09.55 – 10.15	<b>Dante T. Castro Garro</b> , <i>GERICS Hamburg</i> Decomposition of future changes in UTCI using regional climate projections for German cities
10.15 – 10.35	<b>Franz Rubel</b> , <i>Veterinärmedizinische Universität Wien</i> Frühsommer-Meningoenzephalitis (FSME) im Großraum der Alpen: Steigende Fallzahlen zufolge Klimawandel, Klimaanpassung und geändertem Freizeitverhalten
10.35 – 10.55	<b>Katrin Gehrke</b> , <i>pecanode GmbH, Hannover</i> Mikroskalige Ausbreitungsrechnungen zur Untersuchung des Ausbreitungsverhaltens von Schiffsabgasfahnen mit dem Modell PALM
10.55 – 11.10	Pause  Session V: Wälder im Klimawandel
11.10 – 11.30	<b>Daniel Doktor</b> , <i>Helmholtz Centre for Environmental Research – UFZ</i> Einführungsvortrag Session V: Der Waldzustandsmonitor – ein Wissenstransferprojekt
11.40 – 12.00	<b>Thomas Grünwald</b> , <i>TU Dresden</i> Windbruchfläche ist nach Wiederaufforstung 11 Jahre CO <sub>2</sub> -Quelle
12.00 – 13.00	Mittagspause
13.00 – 13.20	<b>Thomas Foken</b> , <i>Bayreuther Zentrum für Ökologie und Umweltforschung BAYCEER</i> Estimating carbon fluxes immediately after a wildfire and in the following years
13.20 – 13.40	<b>Andreas Christen</b> , <i>Universität Freiburg</i> Irreversible Änderungen im Kohlenstoff- und Wasserhaushalt eines Kiefernwaldes der Oberrheinebene als Folge wiederholter sommerlicher Dürren
13.40 – 14.00	<b>Barbara Brunschweiler</b> , <i>TU München</i> Der Einfluss von Waldstrukturen auf lokale Luft- und Bodenklimafaktoren eine Projektvorstellung
14.00 – 14.30	Verabschiedung / Schlusswort
14.30	Ende der Fachtagung

# 1 Städte im Klimawandel

## 1.1 Vorträge

### Eine Stadt im Klimawandel – Stuttgart

*Jürgen Baumüller*

Universität Stuttgart, Institut für Landschaftsplanung und Ökologie (Deutschland)

#### Einleitung

Was die Klimaanpassung angeht, hat Stuttgart eine lange Erfahrung. So wurde 1818 als Folge des „Jahres ohne Sommer“ (1816) in Stuttgart von König Wilhelm I. eine „*Landwirtschaftliche Unterrichts-, Versuchs- und Musteranstalt*“, (heute die Universität Hohenheim) gegründet, mit dem Ziel dem Klima angepasste Getreide- Futter- und Gewerbpflanzen, welche das deutsche Klima ertragen, zu erfassen und zu entwickeln. Seit 1878 besteht auch deshalb eine der längsten Klimamessreihen in Stuttgart Hohenheim.

Durch die Lage der Stuttgarter Innenstadt in einem Talkessel war und ist die stadtklimatische Situation (Luft und Klima) eine wichtige Planungsaufgabe, was durch die Einstellung eines Stadtklimatologen schon 1938 dokumentiert ist.

Nachdem der DWD seine Messstation in der Innenstadt 1984 aufgab, hat die Abteilung Stadtklimatologie der Landeshauptstadt eine eigene Stadtstation 1987 eingerichtet. So ist es möglich den Einfluss des Klimawandels auch im Vergleich mit dem Umland der letzten 36 Jahre zu betrachten.

#### Lufttemperatur

Wie auf globaler Ebene zeigt sich der Klimawandel auch bei der Temperaturentwicklung in Stuttgart-Hohenheim. Bis 1920 steht nur ein leichter Temperaturanstieg an, der ab 1970 sehr stark ausgeprägt ist. Seit 1978 beträgt die Temperaturzunahme 3 Grad (Abb. 1) und liegt damit deutlich über dem globalen Anstieg.

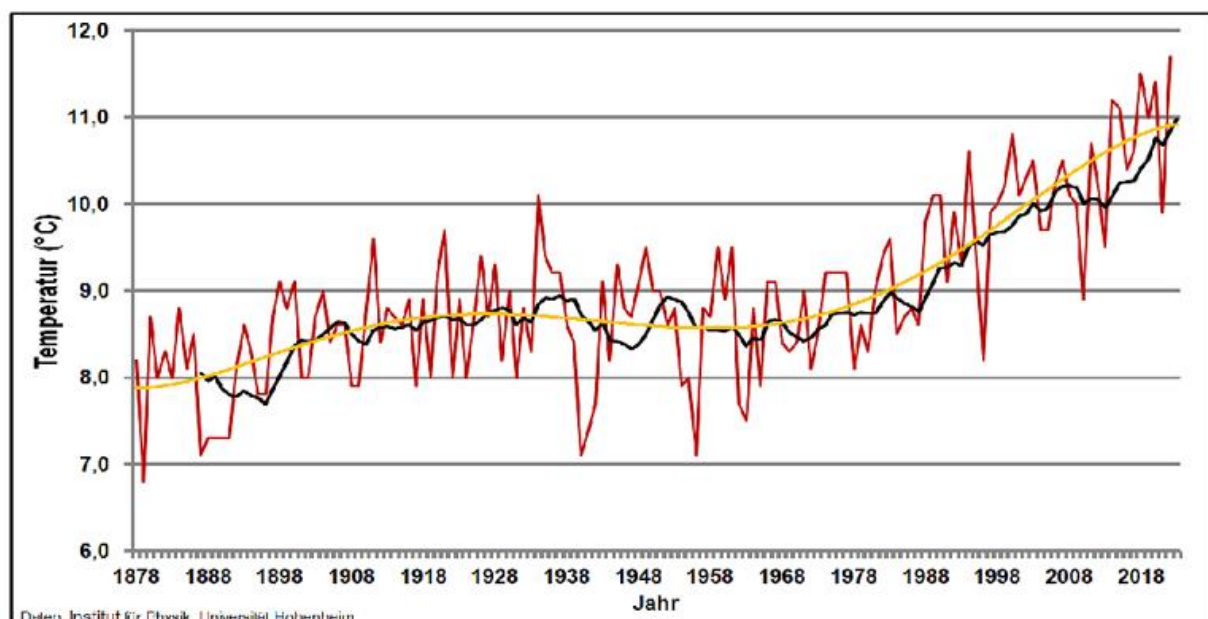


Abb. 1: Entwicklung der Lufttemperatur in Stuttgart-Hohenheim 1878 bis 2022, 10 Jahre geglättet und Trendlinie, Quelle: Institut für Physik, Universität Hohenheim.

Diese Entwicklung gilt auch für die Innenstadt, wo die Temperatur seit 1951 von ca. 10°C auf inzwischen 13 °C zugenommen hat. Seit 1987 haben sich die Sommertage ( $T_{\max} \geq 25^\circ\text{C}$ ) bis 2023 von 40 auf über 90 Tage verdoppelt, die heißen Tage ( $T_{\max} \geq 30^\circ\text{C}$ ) von 10 auf 30 verdreifacht und die Anzahl der Tropischen Nächte ( $T_{\min} \geq 20^\circ\text{C}$ ) liegen nun bei 10, während sie früher kaum vorkamen. Im Jahr 2018 gab es in der Innenstadt von Stuttgart 17 Tage in Folge über maximal 30°C und 2015 17 Tage über 35 °C. Die jährliche Maximaltemperatur ist seit 1951 von ca. 32 °C auf fast 38 °C gestiegen und die mittlere Sommertemperatur in der Innenstadt liegt nun bei über 21 °C. Diese Entwicklung der Sommertage, Heißen Tage, Jahresmaximaltemperaturen und der Tropischen Nächte zeigt sehr deutlich den Klimawandel in der Großstadt Stuttgart und die Herausforderung einer Klimawandelanpassung.

### Niederschlag

Die Niederschlagsmessreihe von Stuttgart Hohenheim von 1878 bis heute zeigt Schwankungen des Niederschlags von Jahr zu Jahr, die zwischen bei 1000 mm bis 400 mm liegen. Ein eindeutiger Trend ist nicht zu erkennen. Eventuell ein leichter Rückgang seit 2004 (Abb. 2).

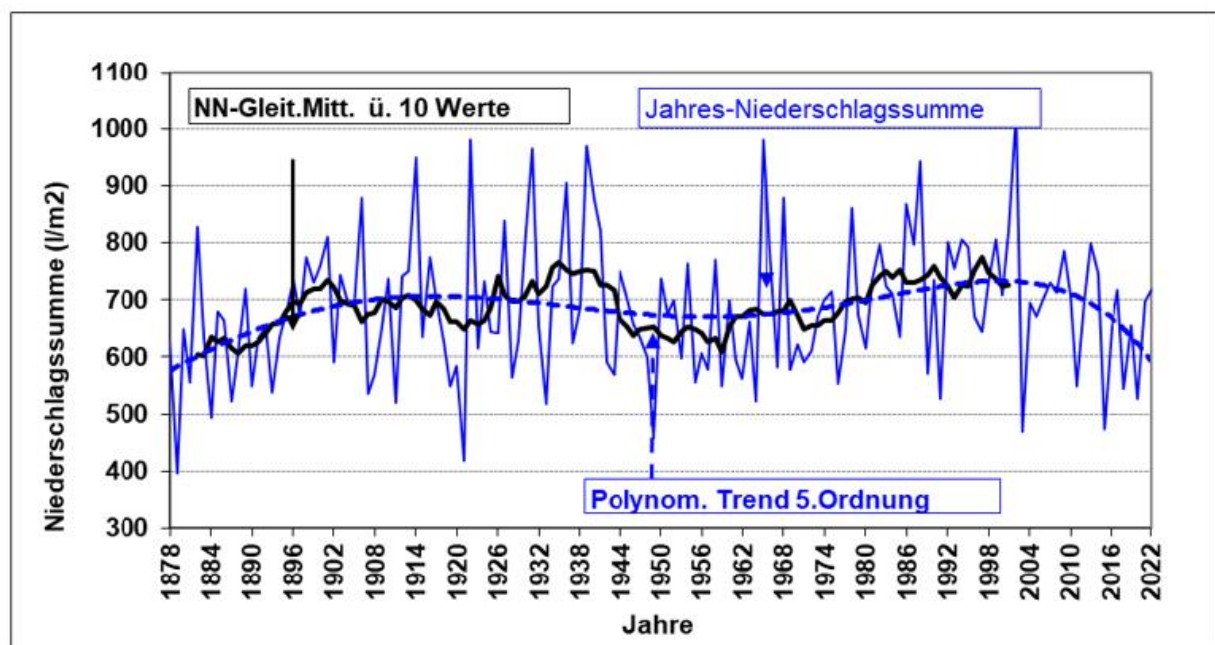


Abb. 2: Stuttgart-Hohenheim - Jahresniederschlagssummen (1878-2022) über 10 Jahre geglättet und Trendlinie; Daten: Institut für Physik und Meteorologie, Universität Stuttgart Hohenheim.

Von Starkregenfällen mit Überflutungen blieb Stuttgart bisher weitgehend verschont und das Hagelunwetter 1972 war sicher nicht dem Klimawandel geschuldet. Starkregengefahrenkarten sind zwischenzeitlich erstellt (Abb. 3).

In den letzten Jahren trat jedoch in den Sommermonaten in Stuttgart häufiger Trockenheit auf. Diese Trockenheit ist ein großräumiges Ereignis, das insbesondere die grüne Infrastruktur in der Stadt schädigt und bei langer Dauer auch für den Baumbestand Probleme bereitet. Um die Straßenbäume zu bewässern hat die Stadt zusätzliches Personal eingestellt und setzt 16 Bewässerungsfahrzeuge ein, um bis zu 40.000 Bäume zu versorgen.



Abb. 3: Überflutungskarte (Ausschnitt) von Stuttgart-Mitte bei einem seltenen Regenereignis.  
<https://maps.stuttgart.de/stadtplan/>

### Vulnerabilität

Untersuchungen der Vulnerabilität zeigen insbesondere Hot-Spots in der Innenstadt von Stuttgart (Abb. 4), wo auch die Betroffenheit durch Pflegeeinrichtungen und Krankenhäusern hoch ist.

Die räumlichen Unterschiede der Vulnerabilität ergeben sich durch unterschiedliche Wärmebelastung, Luftbelastung und der Erreichbarkeit von Erholungsbereichen. Betroffen ist insbesondere die Bevölkerung in den Tallagen und den dicht bebauten Strukturen.

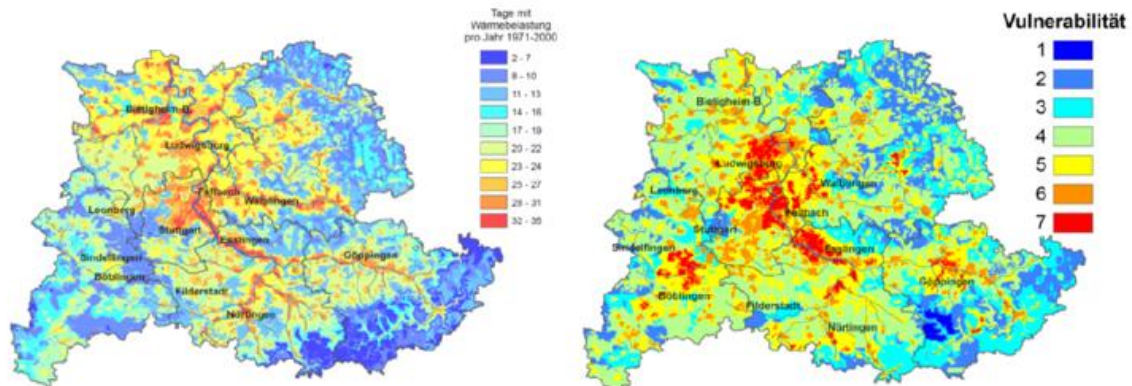


Abb. 4: Tage mit Wärmebelastung (1971-2000) in der Region Stuttgart links, gesundheitliche Vulnerabilität ohne Berücksichtigung der Bevölkerungsdichte rechts, Quelle: Klimaatlas Region Stuttgart (2008), Minnich L.J. (2010).

### Die Zukunft

Die Wärmebelastung in der Region Stuttgart wird in der Zukunft weiter zunehmen, verbunden mit einer Zunahme betroffener Bevölkerungsschichten (Abb. 5 und 6).

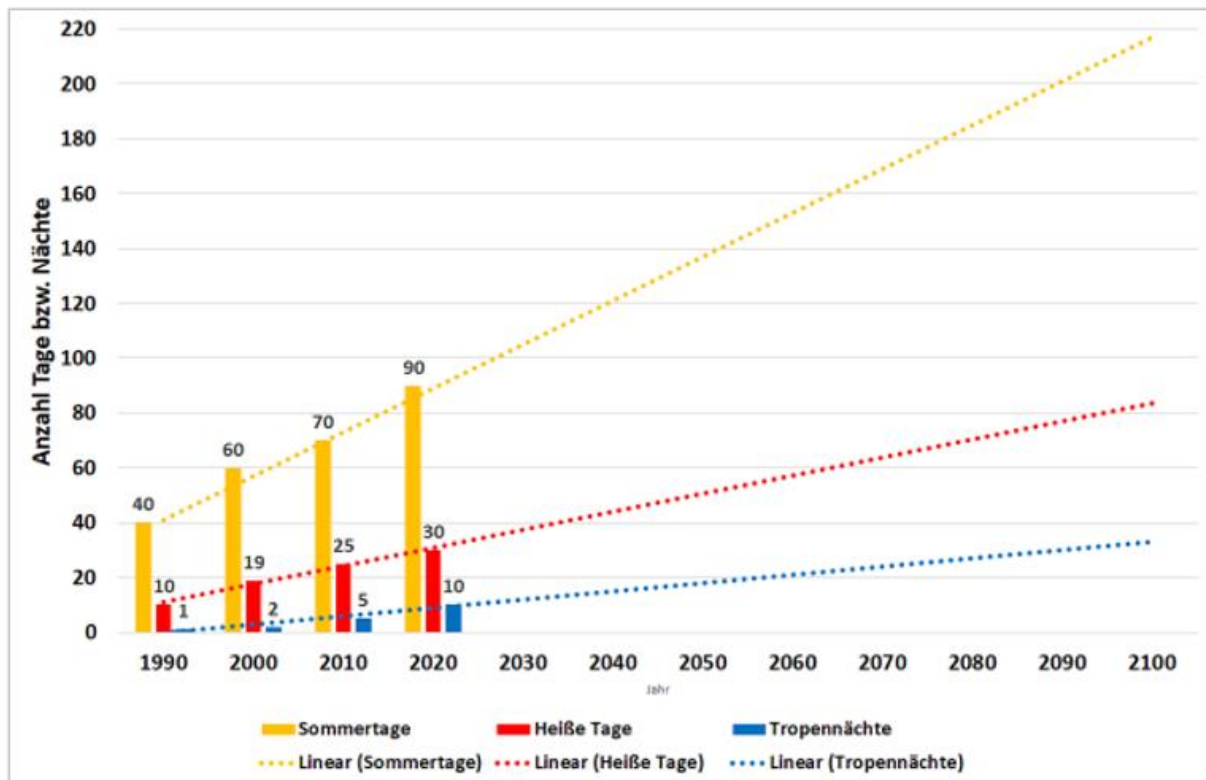


Abb. 5: Entwicklung einiger Klima-Kennzahlen in Stuttgart bis 2100 (linearer Fortgang); Daten: DWD, AfU Stuttgart.

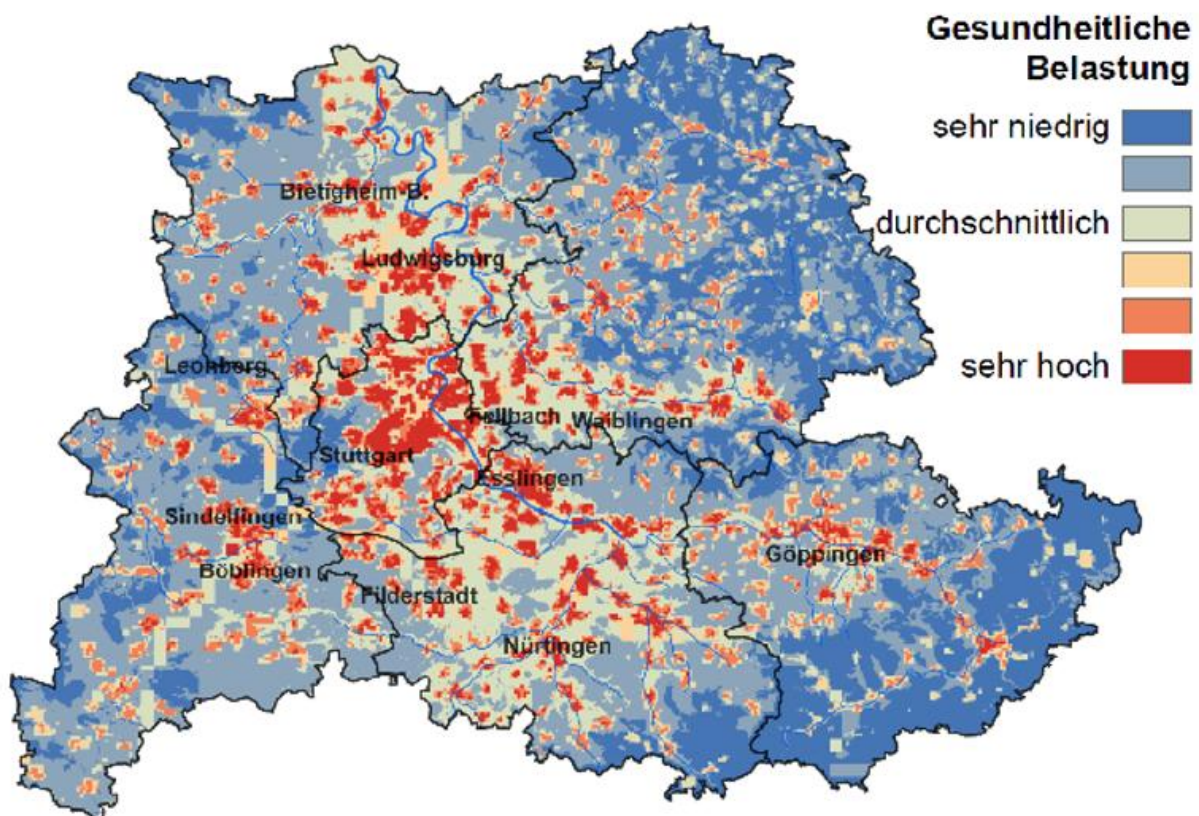


Abb. 6: Verteilung der zukünftigen Gesundheitsbelastung in der Region Stuttgart, Minnich L.J. (2010).

Die Bestandsaufnahme des heute schon deutlich bemerkbaren Klimawandels in Stuttgart und die zu erwartende zukünftige Entwicklungen erfordern Anpassungsmaßnahmen im planerischen Bereich für den öffentlichen Raum. Um auch die Innenräume von Gebäuden im Sommer kühl zu halten, wird in Zukunft eine Klimatisierung notwendig werden, vor allem bei Altenheimen, Pflegeeinrichtungen und Krankenhäusern.

Durch die Abteilung Stadtklimatologie wurden seit Jahren und werden auch heute alle neuen Bebauungspläne hinsichtlich des Klimas, der Klimaanpassung und der Luftreinhaltung begutachtet und Empfehlungen für Verbesserungen ausgesprochen. Das Klimaanpassungskonzept (KLIMAKS (2012)) wird derzeit überarbeitet und fortgeschrieben.

Stuttgart benutzt u.a. auch städtebauliche Rahmenpläne als Instrument einer erfolgreichen Klimaanpassung. Rahmenpläne sind informelle Planungen, um auch konkrete klimatische Entwicklungsziele festzulegen. Vorliegende Rahmenpläne sind z.B. der Rahmenplan Halbhöhenlagen (2008) und der Rahmenplan Talgrund Stuttgart West (2018).

**Literatur:**

MINNICH, L.J., 2010: Gesundheitliche Folgen des Klimawandels bei erhöhter Wärmebelastung in der Region Stuttgart – Eine räumliche Vulnerabilitätsuntersuchung, Diplomarbeit Universität Stuttgart.  
KLIMAATLAS REGION STUTTGART, (2008), Hrsg. Verband Region Stuttgart.  
KLIMAKS, 2012, Klimawandel- Anpassungskonzept Stuttgart, Schriftenreihe des Amtes für Umweltschutz Heft 1/2013, Landeshauptstadt Stuttgart.

**Schlüsselwörter:** Klimawandel, Hitze, Vulnerabilität, Anpassung

## Variation der Landoberflächentemperatur städtischer Landnutzungsklassen basierend auf der Baumbestandsverteilung: Ein fernerkundlicher Ansatz

*Andrea Sofia García de León<sup>1,2</sup>, Antonio Castañeda<sup>1,2</sup>, Nils Karges<sup>2,3</sup>, Tobias Leichtle<sup>4</sup>, Thomas Rötzer<sup>5</sup>, Annika Ludwig<sup>2</sup>, Andreas Bury<sup>2</sup>, Klaus Martin<sup>6</sup>, Tobias Ullmann<sup>1</sup>, Hannes Taubenböck<sup>1,4</sup>*

<sup>1</sup>Universität Würzburg, Institut für Geographie und Geologie, Earth Observation Research Cluster, John-Skilton-Straße 4a, 97074 Würzburg (Deutschland)

<sup>2</sup>UrbanSens, Magdalene-Schoch-Straße 5, 97074 Würzburg (Deutschland)

<sup>3</sup>Universität Würzburg, Institut für Geographie und Geologie, Arbeitsgruppe Sozialgeographie, 97074 Würzburg (Deutschland)

<sup>4</sup>Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum (DFD), Münchner Straße 20, 82234 Weßling (Deutschland)

Lehrstuhl für Waldwachstumskunde, School of Life Sciences, Weihenstephan, Technische Universität München, Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 2, 85354, Freising (Deutschland)

<sup>6</sup>Sachverständigenbüro für Luftbilddauswertung und Umweltfragen (SLU), Kohlsteiner Straße 5, 81243 München (Deutschland)

### Einleitung

Die fortschreitende Urbanisierung konzentriert immer mehr Menschen und Assets in städtischen Räumen (UN, 2019). Die damit verbundene Transformation der natürlichen Landbedeckung (z.B. Taubenböck et al., 2012), d.h. die Zunahme der Bodenversiegelung und anthropogener Wärmequellen erhöht deren Exposition (Chen et al., 2017). Ein Beispiel für die Folgen dieser Veränderungen ist die Entstehung städtischer Wärmeinseln (Urban Heat Island, UHI), die sich durch erhöhte Temperaturen in städtischen Gebieten im Vergleich zum nicht-städtischen Umland auszeichnen (Oke, 1987). UHIs beeinträchtigen den Energieverbrauch, die Luftqualität sowie auch die Gesundheit und damit die Lebensqualität städtischer Gebiete (Akbari & Kolokotsa, 2016; Sarrat et al., 2006; Tan et al., 2010).

Die strategische Pflanzung von Bäumen in städtischen Landschaften kann UHI-Effekte mildern, den thermischen Komfort verbessern und die Nachhaltigkeit sowie Widerstandsfähigkeit in städtischen Umgebungen fördern (Massaro et al., 2023; Rahman et al., 2020). Stadtbäume spenden Schatten, absorbieren Sonnenstrahlung, setzen durch Transpiration Wasserdampf frei und tragen damit zur Temperaturregulierung bei (Rahman et al., 2019). Diese kombinierten Effekte sind Teil der Ökosystemdienstleistungen, die von städtischen Bäumen bereitgestellt werden (Rötzer et al. 2019).

Die Wechselwirkung zwischen der Landoberflächentemperatur (land surface temperature, LST) und der Verteilung von Stadtbäumen wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst, darunter Anzahl von Bäumen, Baumart, Kronendichte und räumliche Anordnung innerhalb unterschiedlicher Landnutzungskategorien (Buyantuyev & Wu, 2010; Dong et al., 2022). Das Verständnis dieser Beziehungen ist für die Entwicklung effektiver städtischer Planungsstrategien entscheidend, um diese Effekte gezielt zur Milderung von Temperaturextremen nutzen zu können.

Diese Studie erforscht die Beziehung zwischen den Merkmalen städtischer Bäume und der LST im Mittleren Ring in München, Deutschland. Ziel ist es zu ergründen, ob eine vergrößerte Baumkronenfläche in Städten mit einer verringerten LST korreliert und wie die verschiedenen Merkmale der Landnutzungskategorien diese Beziehung modulieren.

### Methodik

Unsere Methodik verwendet räumlich hochauflösende Satellitenbilddaten der Missionen Landsat 8 und Sentinel-2, um die LST räumlich detailliert für das Jahr 2020 abzuleiten. Landsat 8-Daten stehen im thermischen Infrarotbereich mit einer räumlichen Auflösung von 100 Metern bereit, während Sentinel-2 multispektrale optische Bilder mit einer räumlichen Auflösung von 10 bis 20 Metern bietet. Obwohl es an thermischen Bändern fehlt, ist die hohe räumliche Auflösung von Sentinel-2-Bildern entscheidend für so genannte Downscaling-Techniken. In dieser Studie wenden wir eine Downscaling-Methodik

basierend auf Onačillová et al. (2022) an, um eine umfassende räumliche Analyse von Temperaturschwankungen mit hoher räumlicher Auflösung durchzuführen.

Zur Charakterisierung von Stadtbäumen auf Einzelbaumebene verwendeten wir die fernerkundlich erhobenen Daten von Leichtle et al. (2021), die mehr als 166.000 Bäume innerhalb des Mittleren Rings von München umfassen. Zur Erkennung und Abgrenzung von Stadtbäumen wurden Bildverarbeitungstechniken auf räumlich sehr hochauflösende Bilder angewandt. Wir extrahierten die Kronenfläche und ordneten sie den Polygonen des Landnutzungsdatensatzes (ATKIS, 2023) zu. Das Untersuchungsgebiet deckt 11 Landnutzungsklassen ab, die in fünf Kategorien eingeteilt wurden: ‚Wohnen‘, ‚Industrie‘, ‚Freizeit‘, ‚Verkehr‘ und ‚Gemischte‘ Flächen. ‚Wohnen‘ bezieht sich auf Gebäude und Gärten, ‚Verkehr‘ beinhaltet Straßen und Schienen, ‚Freizeit‘ beinhaltet Sportanlagen, Wälder, Marktplätze und Erholungsgebiete, ‚Industrie‘ umfasst funktionale Gebäude und Industrieanlagen, während ‚Gemischte‘ eine Kombination der genannten Kategorien darstellt.

Um die Relationen zwischen Baumkronendichte und den Variationen der LST in jeder Landbedeckungskategorie zu quantifizieren, wird eine lineare Regressionsanalyse durchgeführt. Baumdichte und Kronenabdeckung werden als unabhängige Variablen verwendet, während die mittlere LST der Sommermonate (Juni bis September) die abhängige Variable ist. Diese Monate wurden ausgewählt, da sie die geringste Bewölkung aufweisen und die wärmsten sind, um die LST-dynamik besser zu bewerten. Die Regressionsmodelle werden auf Basis der Polygone des ALKIS-Landnutzungsdatensatzes angewandt, um eine stratifizierte Analyse für jede Landnutzungskategorie zu ermöglichen.

### **Ergebnisse und Diskussion**

Abbildung 1 zeigt die resultierenden Streudiagramme und die Regressionsmodelle für verschiedenen Landnutzungskategorien. Auf der vertikalen Achse befindet sich die LST und auf der horizontalen Achse der Prozentsatz der von Baumkronen bedeckten Fläche bzw. die Baumkronendichte. Darüber hinaus ist die Häufigkeitsverteilung der LST auf der rechten Seite des Diagramms enthalten.

In allen Klassen wird eine konsistente negative Korrelation beobachtet, d.h. die LST nimmt in allen betrachteten Landnutzungskategorien mit zunehmender Baumkronendichte ab. Die Korrelationskoeffizienten ( $R^2$ ) erstrecken sich von 0,41 in der Klasse ‚Freizeit‘ bis zu 0,62 in der Klasse ‚Verkehr‘, wobei Steigungen von  $-0,04\text{ °C}/\%$  für ‚Freizeitflächen‘ bis  $-0,084\text{ °C}/\%$  für Wohnnutzungsflächen beobachtet wurden. Die Häufigkeitsverteilung zeigt, dass die Klassen ‚Wohnen‘ und ‚Gemischte Flächen‘ eher hohe LST aufweisen, während die Klasse ‚Freizeit‘ überwiegend durch niedrige Werte ausgezeichnet ist. ‚Industrie‘- und ‚Verkehrsflächen‘ zeigen hohe LST bei weniger ausgeprägter Konzentration der Werte.

Bei genauerer Betrachtung zeigt die Klasse ‚Freizeit‘ den insgesamt niedrigsten  $R^2$  mit einem Wert von 0,41. Die Baumkronendichte in dieser Klasse ist mit 75-100% überwiegend hoch, was mit dem Vorhandensein von Wäldern und Parks übereinstimmt. Die höheren Werte der Baumkronendichte sind mit einer Häufung niedrigerer LST von etwa  $33\text{ °C}$  verbunden. Aufgrund der inhärenten Heterogenität der Klasse, zu der neben Parkanlagen und Wäldern auch baumlose Bereiche wie Marktplätze in öffentlichen Räumen und Sporteinrichtungen gehören, zeigt sie eine bemerkenswerte Bandbreite von Temperaturen.

Im Gegensatz dazu zeigt die Klasse ‚Wohnen‘ eine Häufung von LST im oberen Bereich um  $39\text{ °C}$  mit einem ausgeprägten Maximum der Verteilung. Dies lässt sich vermutlich durch das dichte innerstädtische Gefüge erklären, in dem aufgrund der dichten Bebauung nur eine geringe Anzahl von Bäumen vorhanden ist.

### **Fazit**

Unsere Analyse zeigt eine konsistent negative Korrelation zwischen der Landoberflächentemperatur und der Baumkronendichte, was den Einfluss einer höheren Baumdichte auf niedrigere LST-Werte belegt. Darüber hinaus zeigt sie, dass diese Beziehung über verschiedene Landbedeckungsklassen hinweg besteht und in Gebieten mit geringerer Vegetation stärker ausgeprägt ist. Damit wird empirisch

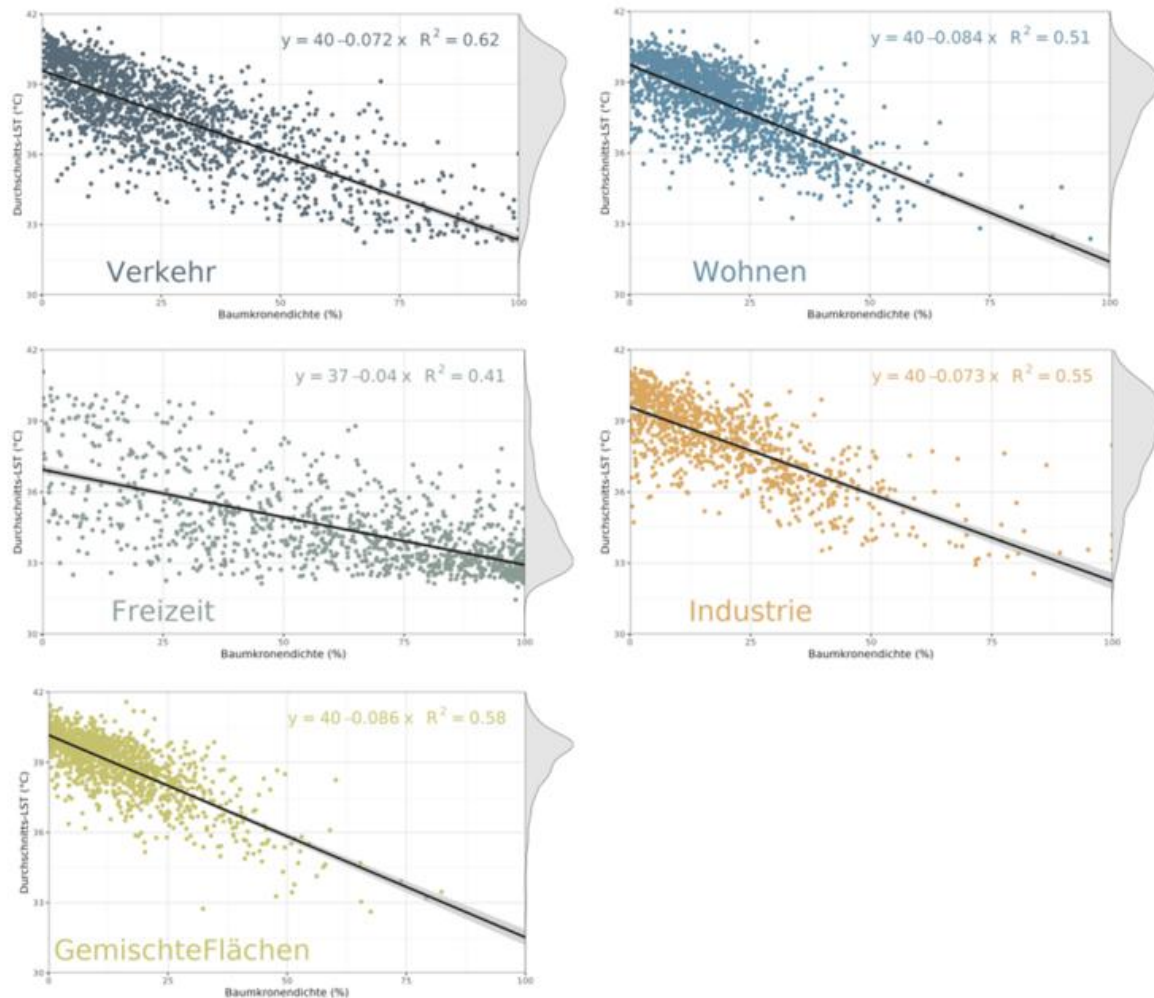


Abb. 1: Regressionsmodelle von Oberflächentemperatur (LST) gegenüber der Baumkronendichte für die Landnutzungskategorien ‚Verkehr‘, ‚Wohnen‘, ‚Freizeit‘, ‚Industrie‘ und ‚Gemischte Flächen‘ innerhalb des Mittleren Rings in München.

aufgezeigt, dass Bäume eine wichtige Klimafunktion in Städten sein können und gezielt in Planungsprozessen bedacht werden sollten.

Um die Präzision unserer Ergebnisse zu verbessern, schlagen wir für zukünftige Arbeiten eine differenziertere Herangehensweise vor. Die Steigung der Regressionsgeraden dient als Indikator für den Einfluss der Baumverteilung auf die LST innerhalb einer spezifischen Klasse. Große Steigungen, wie in den Klassen ‚Gemischte Flächen‘ und ‚Wohnen‘, deuten auf einen größeren Kühlungseffekt hin, während niedrige Steigungen, wie in der Klasse ‚Freizeit‘, auf einen weniger ausgeprägten Einfluss hindeuten. Die Verwendung von Unterklassen, die aus dem allgemeinen Verhalten jeder Klasse abgeleitet sind, könnte zu einer präziseren Segmentierung führen und die Mischung unterschiedlicher Einflüsse innerhalb der gewählten Kategorien vermeiden.

#### Literatur:

AKBARI, H., KOLOKOTSA, D., 2016: Three decades of urban heat islands and mitigation technologies research. *Energy and Buildings*, 133, 834–842.

ATKIS., 2023: Tatsächliche Nutzung (TN) [dataset].

<https://geodaten.bayern.de/opengeodata/OpenDataDetail.html?pn=tatsaechlichenutzung>

- BUYANTUYEV, A., & WU, J., 2010: Urban heat islands and landscape heterogeneity: linking spatiotemporal variations in surface temperatures to land-cover and socioeconomic patterns. *Landscape Ecology*, 25(1), 17–33.
- CHEN, Y.-C., CHIU, H.-W., SU, Y.-F., WU, Y.-C., & CHENG, K.-S., 2017: Does urbanization increase diurnal land surface temperature variation? Evidence and implications. *Landscape and Urban Planning*, 157, 247–258.
- DONG, R., WURM, M., & TAUBENBÖCK, H., 2022. Seasonal and Diurnal Variation of Land Surface Temperature Distribution and Its Relation to Land Use/Land Cover Patterns. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(19).
- LEICHTLE, T., ZEHNER, M., KÜHNLE, M., MARTIN, K., & TAUBENBÖCK, H., 2021. Urban Trees – Detection, Delineation, Quantification, and Characterisation based on VHR Remote Sensing. REAL CORP 2021: CITIES 20.50. 26th International Conference on Urban Planning, Regional Development and Information Society, Vienna, Austria.
- MASSARO, E., SCHIFANELLA, R., PICCARDO, M., CAPORASO, L., TAUBENBÖCK, H., CESCATTI, A., & DUVEILLER, G. (2023). Spatially-optimized urban greening for reduction of population exposure to land surface temperature extremes. *Nature Communications*, 14(1), 2903.
- OKE, T. R., 1987: *Boundary layer climates*. Routledge.
- ONAČILLOVÁ, K., GALLAY, M., PALUBA, D., PÉLIOVÁ, A., TOKARČÍK, O., & LAUBERTO-VÁ, D., 2022. Combining Landsat 8 and Sentinel-2 Data in Google Earth Engine to Derive Higher Resolution Land Surface Temperature Maps in Urban Environment. *Remote Sensing*, 14(16), 4076.
- RAHMAN, M. A., MOSER, A., RÖTZER, T., & PAULEIT, S., 2019. Comparing the transpirational and shading effects of two contrasting urban tree species. *Urban Ecosystems*, 22(4), 683–697.
- RAHMAN, M. A., STRATOPOULOS, L. M. F., MOSER-REISCHL, A., ZÖLCH, T., HÄBERLE, K.-H., RÖTZER, T., PRETZSCH, H., & PAULEIT, S., 2020. Traits of trees for cooling urban heat islands: A meta-analysis. *Building and Environment*, 170.
- RÖTZER, T., RAHMAN, M. A., MOSER-REISCHL, A., PAULEIT, S., & PRETZSCH, H., 2019: Process based simulation of tree growth and ecosystem services of urban trees under present and future climate conditions. *Science of The Total Environment*, 676.
- SARRAT, C., LEMONSU, A., MASSON, V., & GUEDALIA, D., 2006: Impact of urban heat island on regional atmospheric pollution. *Atmospheric Environment*, 40(10), 1743–1758.
- TAN, J., ZHENG, Y., TANG, X., GUO, C., LI, L., SONG, G., ZHEN, X., YUAN, D., KALKSTEIN, A. J., LI, F., & CHEN, H., 2010: The urban heat island and its impact on heat waves and human health in Shanghai. *International Journal of Biometeorology*, 54(1), 75–84.
- TAUBENBÖCK, H., ESCH, T., FELBIER, A., WIESNER, M., ROTH, A., & DECH, S. (2012). Monitoring urbanization in mega cities from space. *Remote Sensing of Environment*, 117, 162–176.
- UNITED NATIONS. (2019). *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision*.

**Schlüsselwörter:** Bodenoberflächentemperatur, Stadtwaldgebiet, Fernerkundung, Landnutzungs-klassen

## Einfluss der Vegetationsstruktur auf das Kühlungspotential von städtischen Grünflächen in München

*Sophie Arzberger<sup>1</sup>, Monika Egerer<sup>2</sup>, Peter Annighöfer<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Professur für Wald- und Agroforstsysteme, Technische Universität München, Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 2, 85354 Freising (Deutschland)

<sup>2</sup>Professur für Urbane Produktive Ökosysteme, Technische Universität München, Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 2, 85354 Freising (Deutschland)

Stadtgrün hat einen entscheidenden Einfluss auf die Regulierung des Mikroklimas in der Stadt. Besonders öffentliche Grünflächen spielen aufgrund ihrer Zugänglichkeit eine wichtige Rolle für das Wohlbefinden und den thermischen Komfort der städtischen Bevölkerung. Das Kühlungspotential einer städtischen Grünfläche wird von verschiedenen Parkeigenschaften wie Größe, Form und Gestaltung der Vegetation beeinflusst. Vor allem die strukturelle Zusammensetzung der Vegetation und die artspezifische Kühlleistung der Bäume sind von großer Bedeutung für die Kühlungswirkung einer Grünfläche. Um die Wirkung verschiedener Vegetationszusammensetzungen und -strukturen auf das Kühlungspotential genauer zu untersuchen, wurde in 60 Versuchsflächen in unterschiedlich großen und unterschiedlich strukturierten Münchner Grünflächen für ein Jahr Lufttemperatur und -feuchte gemessen. Die gleichen Messgrößen wurden an ausgewählten Referenzpunkten in der grauen Infrastruktur erfasst, um den relativen Kühlungseffekt der Grünflächen zu bestimmen. Zusätzlich wurde die strukturelle Komplexität der Vegetation mittels terrestrischem Laserscanning erfasst und die Gehölzartenvielfalt kartiert.

Die Ergebnisse aus dem Jahr 2023 zeigen, dass die Temperaturunterschiede zwischen Grün- und Grauf Flächen in München an heißen Tagen bis zu 4 °C betragen können. Obwohl die meisten Grünflächen im Sommer eine deutliche Kühlungswirkung zeigten, waren einige Münchner Parks im Mittel wärmer als ihre städtische Umgebung. Den größten Einfluss auf den relativen Kühlungseffekt hatte dabei nicht die Größe der Grünflächen, sondern die strukturelle Komplexität der Vegetation. Kleine Grünflächen mit hoher Strukturvielfalt hatten einen höheren Kühlungseffekt als große Grünflächen mit geringer struktureller Komplexität. Es können folglich auch kleine Grünflächen einen wichtigen Beitrag zur Regulierung des Stadtklimas leisten – bei entsprechender Gestaltung der Vegetation. Dieses Ergebnis dient als wichtiger Anhaltspunkt für die zukünftige Grünflächenentwicklung unserer Städte: Um das Kühlungspotential einer Grünfläche bestmöglich auszunutzen, muss die strukturelle Komplexität der Vegetation erhöht werden.

# Einfluss von Witterung und Klima auf die Wachstumsmuster wichtiger Stadtbaumarten

Eleonora Franceschi<sup>1</sup>, Astrid Moser-Reischl<sup>1,2</sup>, Mohammad A. Rahman<sup>2</sup>, Thomas Rötzer<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Lehrstuhl für Waldwachstumskunde, TUM School of Life Sciences, Technische Universität München, Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 2, 85354 Freising (Deutschland)

<sup>2</sup> Lehrstuhl für Strategie und Management der Landschaftsentwicklung, TUM School of Life Sciences, Technische Universität München, Emil-Ramann-Str. 6, 85354 Freising (Deutschland)

## Einleitung

Im Vergleich zu Waldbäumen wachsen Stadtbäume unter erheblich erschwerten Bedingungen. Die urbane Landschaft stellt mit den oft kleinen Pflanzgruben, hoher Versiegelung und Bodenverdichtung sowie hohen Schadstoffkonzentrationen eine große Herausforderung für das Wachstum und die Vitalität der Stadtbäume dar (Roloff, 2013). Zudem ist es in den Städten aufgrund der städtischen Wärmeinsel wärmer als in deren Umland (Oke, 1982). Mit dem voranschreitenden Klimawandel werden die Lufttemperaturen in der Stadt weiter steigen und den Hitze- und Trockenstress der Stadtbäume erhöhen. Um die Auswirkungen des Klimas auf das Wachstum von häufig gepflanzten Stadtbaumarten zu untersuchen, werden seit mehreren Jahren mittels elektronischer Dendrometer kontinuierlich Stammzuwächse von *Tilia cordata*, *Acer platanoides* und *Robinia pseudoacacia* in München und Würzburg aufgezeichnet. Diese zwei Städte weisen ein unterschiedliches Klima auf, mit im Mittel höheren jährlichen Niederschlägen in München (DWD, 2023). Daher können nicht nur baumartenspezifische Wachstumsmuster analysiert werden, sondern auch klimabedingte Unterschiede. Diese Studie untersucht den Einfluss von Stadtklima und lokalen standortspezifischen Charakteristiken auf das Stammwachstums sowie auf die Wachstumsdauer von drei häufig gepflanzten Stadtbaumarten. Dabei sollen baumartenspezifische Reaktionsmuster des Wachstums aufgezeigt werden, die Planungsentscheidungen zur Baumartenwahl unterstützen.

## Materialien und Methoden

Die Wachstumsanalysen dieser Studie basieren auf Dendrometerdaten von permanenten Messstationen (Baumlaboren), die in Würzburg in 2017 und in München in 2020 installiert wurden, wo sowohl baumphysiologische als auch meteorologische Messungen durchgeführt werden. Die Strukturmerkmale der ausgewählten Bäume wurden zu Beginn der Messungen erfasst, darunter der Durchmesser auf Brusthöhe (BHD), die Höhe des Baumes sowie der mittlere Kronenradius (CR) und die Kronenprojektionsfläche (CPA) (siehe Tab. 1).

Tab. 1: Strukturdaten der Bäume zu Beginn der Messungen (2018 in Würzburg, 2020 in München), N = Anzahl der Versuchsbäume.

Baumart	Stadt	N	BHD [cm]	Höhe [m]	CR [m]	CPA [m <sup>2</sup> ]
<i>T. cordata</i>	München	6	37,9	16,2	4,7	71,8
	Würzburg	18	34,1	13,9	4,2	58,7
<i>A. platanoides</i>	München	13	35,9	16,9	4,2	58,1
<i>R. pseudoacacia</i>	Würzburg	8	44,6	14,2	4,3	59,7

Da die Baumlabore mit Wetterstationen ausgestattet sind, können lokale Witterungs- und Klimadaten mit den Stammwachstumsanalysen verknüpft werden. Die Baumlabore wurden entlang eines Gradienten der Landnutzung installiert (vgl. Rahman et al., 2022). Für München wurde eine Verteilung der Baumlabore an verschiedenen Pflanzsituationen ausgewählt, in welchen Bäume in Parks, entlang Straßen und an stark versiegelten Plätzen aufgenommen wurden.

In dieser Studie wurden die gemessenen artenspezifischen Wachstumsmuster, bezüglich Quantität, Wachstumsbeginn und -dauer, sowie die Auswirkungen des Standortmikroklimas auf dem Stammzuwachs analysiert. Untersucht wurde, welchen Einfluss die Witterung bzw. das Klima einer Stadt oder

eines Quartiers auf die Wachstumsmuster haben bzw. welche Klimavariablen den größten Einfluss auf den Jahreszuwachs bzw. auf den Beginn und die Dauer des Wachstums des Stammdurchmessers hat. Durch lineare gemischte Modelle soll die Auswirkung der mittleren jährlichen und saisonalen Lufttemperaturen auf das Stammwachstum bestimmt werden. Zusätzliche klimatische Variablen werden in die Analyse mittels gemischter Modelle einbezogen, wie z.B. die Niederschlagssumme und/oder der Trockenheitsindex nach Rötzer et al. (2012), der sich aus tatsächlicher Evapotranspiration und potentieller Evapotranspiration bildet und als Indikator für Trockenstress fungieren kann. Anhand der hohen zeitlichen Auflösung der Dendrometerdaten in den zwei Städten und aufgrund der langen Aufnahmeperioden (in Würzburg über 5 Jahren) können langfristige Trends über mehrere Jahre sowie kurzfristige Reaktionen von Stadtbäumen auf äußere Einflüsse ausgewertet werden.

## Ergebnisse

In Würzburg war der Grundflächenzuwachs des Stammes von Winterlinden (*T. cordata*) für das Jahr 2018 höher (Abb. 2) an Standorten mit mittlerem Grünflächenanteil und niedrigem Gebäudeanteil (Frauenland) im Vergleich zu einem Standort im Stadtzentrum umgeben von hohen Gebäuden und versiegelten Flächen (Paradeplatz) (Abb. 1).



Abb. 1: Grundflächenzuwachs von Winterlinden am Standort Paradeplatz und am Standort Frauenland in Würzburg im Jahr 2018.

Im Mittel über alle Standorte in München und Würzburg zeigen sich deutliche artenspezifische jährlichen Wachstumsraten: *A. platanoides* und *R. pseudoacacia* weisen mit 0,22 und 0,27 cm/Jahr ähnliche Stammwachstumsraten auf, während die Raten für *T. cordata* mit 0,10 cm/Jahr deutlich niedriger liegen. Sowohl Wachstumsbeginn, Wachstumsdauer als auch die Höhe des Zuwachses sind deutlich von der Baumart abhängig (Abb.2). Aber auch die meteorologischen Bedingungen eines Jahres haben einen markanten Einfluss wie die Verläufe der zwei Jahre 2018 und 2019 belegen (Abb. 2).

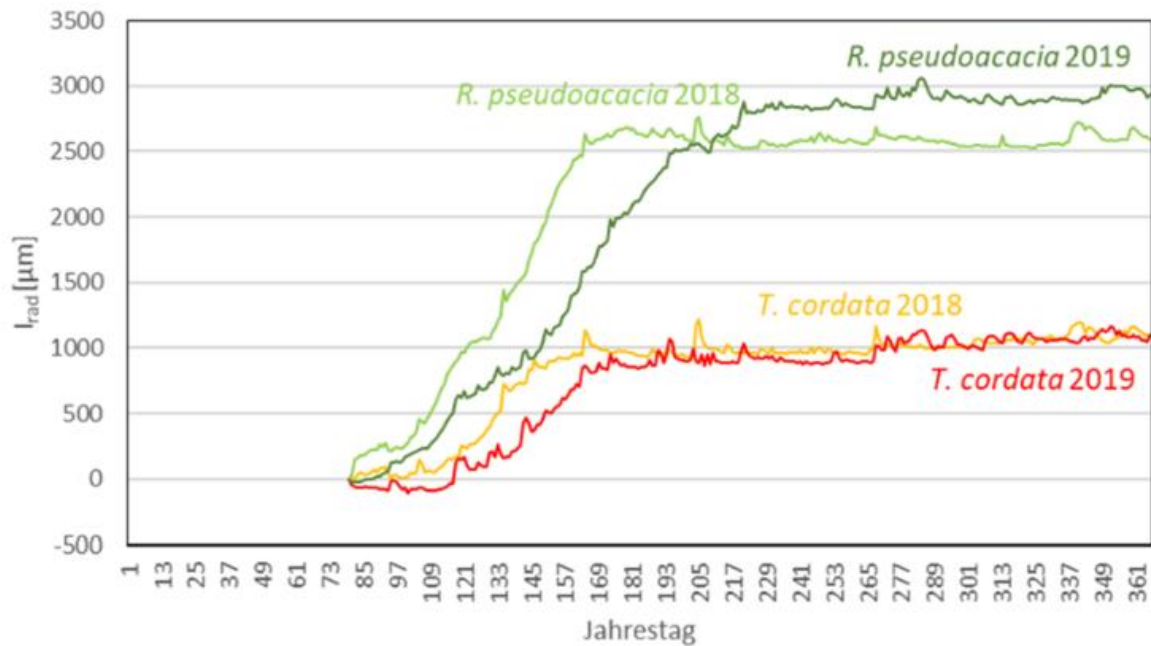


Abb. 2: Akkumulierter Radialzuwachs des Stammes von Winterlinden (*T. cordata*) und Robinien (*R. pseudoacacia*) in Würzburg für die Jahre 2018 und 2019 (nach Rötzer et al., 2021).

Während *R. pseudoacacia* im Jahr 2019 höhere Stammwachstumswerte im Vergleich zu 2018 aufweist, sind die Steigungen der Wachstumskurven in den zwei Jahren unterschiedlich steil. Der Grundflächenzuwachs entlang eines urbanen-suburbanen Gradienten zeigt starke standortspezifische Differenzen. Für das zentrale Baumlabor am Paradeplatz wurden die geringsten Zuwächse gemessen, die nahezu dreimal niedriger lagen als für den suburbanen Standort LGS, der einen deutlich geringeren Versiegelungs- und Bebauungsgrad hat (Abb. 3).

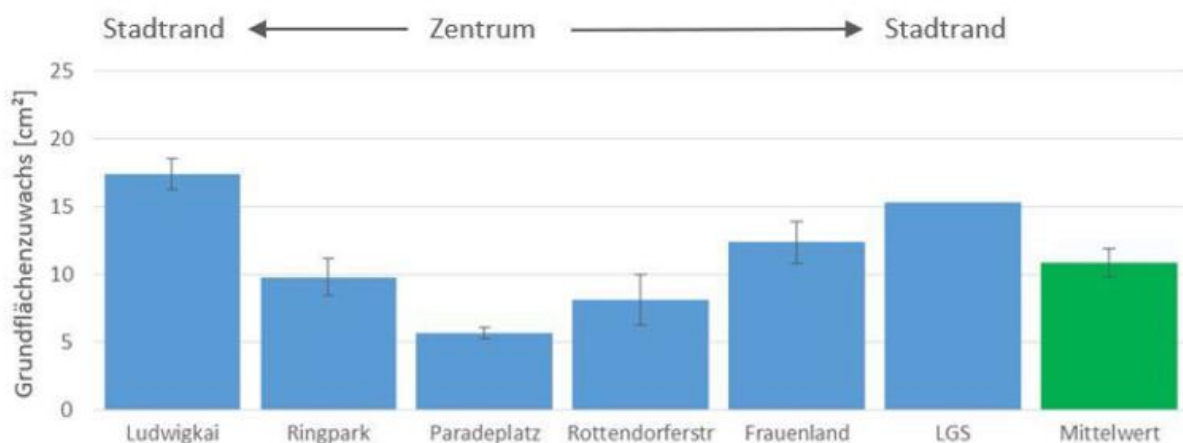


Abb. 3: Grundflächenzuwachs des Stammes von Winterlinden (*T. cordata*) entlang eines Gradienten vom Stadtzentrum zum Stadtrand in Würzburg im Jahr 2018.

Der Beginn des Stammwachstums zeigt deutliche Unterschiede je nach Baumart und Jahr. Bei *R. pseudoacacia* beginnt das Stammwachstum bis zu zwei Wochen früher als bei *A. platanoides* und *T. cordata*. Für letztere wurde die kürzeste Periode des Stammwachstums unter den untersuchten Baumarten berechnet (Tab. 2). Die Wachstumsdauer schwankt sehr stark von Jahr zu Jahr, insbesondere

bei *R. pseudoacacia*. Im Vergleich der Städte zeigt sich, dass das Stammwachstum bei *T. cordata* in Würzburg um mehr 12 Tage früher beginnt als in München (Jahre 2021 und 2022).

Tab. 2: Wachstumsanfang (DOY WA) und Wachstumsende (DOY WE) für die untersuchte Baumarten in den Städten Würzburg und München ab 2018, sowie die Wachstumsdauer in Anzahl an Tagen. Der Standort Ludwigskai wurde hierbei nicht berücksichtigt.

Stadt	Jahr	Baumart	DOY WA	DOY WE	Wachstumsdauer
Würzburg	2018	<i>Tilia cordata</i>	112	140	27
		<i>Robinia pseudoacacia</i>	105	161	56
Würzburg	2019	<i>Tilia cordata</i>	127	167	40
		<i>Robinia pseudoacacia</i>	108	215	108
Würzburg	2020	<i>Tilia cordata</i>	119	165	46
		<i>Robinia pseudoacacia</i>	118	194	76
München	2021	<i>Acer platanoides</i>	132	194	61
		<i>Tilia cordata</i>	162	209	46
Würzburg	2021	<i>Tilia cordata</i>	148	173	26
		<i>Robinia pseudoacacia</i>	140	218	78
München	2022	<i>Acer platanoides</i>	109	156	47
		<i>Tilia cordata</i>	138	178	40
Würzburg	2022	<i>Tilia cordata</i>	126	154	28
		<i>Robinia pseudoacacia</i>	113	196	83

Die Ergebnisse zeigen einen starken Einfluss der Lufttemperatur im Frühling und Sommer auf den Beginn sowie die Dauer der Wachstumsperiode. Für einen hoch versiegelten und im Zentrum von München liegenden Standort (Alter Hof) wurde für das Jahr 2022 ein deutlich früherer Wachstumsbeginn von *A. platanoides* berechnet im Vergleich zum Jahr 2021. Der Grund hierfür könnte in der um 2 °C höheren Temperatur der Monate Februar-Mai im Jahr 2022 gegenüber 2021 liegen.

### Diskussion und Schlussfolgerungen

Für die Städte München und Würzburg wurden artenspezifische Unterschiede in den Stammwachstumsraten gefunden, mit den höchsten Werten für *R. pseudoacacia*. Die Andauer des Stammwachstums ist in hohen Maßen von der Baumart als auch vom Witterungsverlauf des betrachteten Jahres einer Stadt abhängig. Zudem spielt die Lage in der Stadt eine große Rolle für den Zeitraum und die Höhe des Stammwachstums. Auch Hitze- und Trockenstress hatten Auswirkungen auf das Baumwachstum. Außerdem wurden verschieden lange Perioden des Stammwachstums berechnet, die sich sowohl zwischen den Baumarten, als auch zwischen den Städten unterscheiden und teilweise stark von der Jahreswitterung abhängig sind. So zeigen höhere Temperaturwerte während der Hauptwachstumszeit (April-Juli) in der Innenstadt Münchens einen negativen Effekt auf die Länge der Wachstumsperiode von *A. platanoides*, während höhere Temperaturen zum Jahresanfang (Februar-Mai) einen früheren Beginn erwarten lassen.

Unsere Studie zeigt, dass die Wachstumsmuster häufig gepflanzter Stadtbaumarten stark vom Jahres- und Standortklima beeinflusst wird. Angesichts des voranschreitenden Klimawandels müssen diese Zusammenhänge auf unterschiedlichen zeitlichen und räumlichen Skalen untersucht werden, insbesondere mögliche Wachstumsabnahmen während oder nach Hitzewellen und Trockenperioden sind von Bedeutung für das Baummanagement einer Stadt. Die Erweiterung der dadurch gewonnenen Kenntnisse kann Planungsentscheidungen zur Auswahl von geeigneten Baumarten für urbane Standorte sowie den Erhalt des Stadtbaumbestandes unterstützen.

**Literatur:**

DEUTSCHER WETTERDIENST, DWD (2023): Climate Data Center. Online abrufbar unter <https://cdc.dwd.de/portal>

OKE, T., 1982: The energetic basis of the urban heat island. *Q J R Meteorol Soc* 108, 1–24.

RAHMAN, M.A., FRANCESCHI, E., PATTNAIK, N., MOSER-REISCHL, A., HARTMANN, C., PAETH, H., PRETZSCH, H., ROETZER, T., PAULEIT, S., 2022: Spatial and temporal changes of outdoor thermal stress: influence of urban land cover types. *Scientific Reports* 12:671, p. 13.

RÖTZER, T., SEIFERT, T., GAYLER, S., PRIESACK, E., PRETZSCH, H., 2012, Effects of Stress and Defence Allocation on Tree Growth: Simulation Results at the Individual and Stand Level, *Growth and Defence in Plants*, Vol. 220, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, S.401–432.

RÖTZER, T., MOSER-REISCHL, A., RAHMAN, M.A., HARTMANN, C., PAETH, H., PAULEIT, S., 2021: Urban tree growth and ecosystem services under extreme drought. *Agricultural and Forest Meteorology* 308–309: 108532

ROLOFF, A., 2013: *Bäume in der Stadt*. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.

**Schlüsselwörter:** Stadtbäume, Klimawandel, Stammwachstum, Dendrometer, Trockenstress

# Saisonale Dynamik des Blattflächenindex (LAI) ausgewählter Baumarten in städtischer Umgebung

Astrid Moser-Reischl<sup>1,2</sup>, Eleonora Franceschi<sup>1</sup>, Mohammad Asrafur Rahman<sup>2</sup>, Thomas Rötzer<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Lehrstuhl für Waldwachstumskunde, Technische Universität München, Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 2, 85354 Freising (Deutschland)

<sup>2</sup>Lehrstuhl für Strategie und Management der Landschaftsentwicklung, Technische Universität München, Emil-Ramann-Str. 6, 85354 Freising (Deutschland)

## Einleitung

In der sich rasch urbanisierenden Welt erleben Städte enormes Wachstum und starke Transformationen. Schätzungsweise 70% der Weltbevölkerung werden bis 2050 in Städten leben (UN 2018). Städtische Gebiete zeichnen sich durch eine hohe Bodenversiegelung und hohe Bebauungsdichte aus, was zu einem starken Eintrag von Schadstoffen führt und den städtischen Wärmeinseleffekt (UHI) begünstigt (Heaviside et al., 2017; Oke, 2017). Inmitten dieses Dschungels aus Beton erweisen sich urbane grüne Infrastrukturen, insbesondere Stadtbäume, als wichtige Komponenten des städtischen Ökosystems und des Stadtklimas. Stadtbäume bieten eine Vielzahl von Vorteilen für die Umwelt und die Stadtbewohner, die als Ökosystemleistungen (ÖSL) bezeichnet werden (Parsa et al., 2019). Diese reichen von Luftkühlung durch Evapotranspiration, Oberflächenkühlung durch Beschattung, Abflussminderung, Kohlenstoffspeicherung und -bindung durch die Bildung von Biomasse, Förderung der Biodiversität, Luftreinigung durch Schadstofffilterung, Lärmabpufferung bis hin zur Erholungswirkung (MEA 2005).

ÖSL sind wichtige Aspekte des Stadtgrüns, um den Hitzestress der Menschen in der Stadt auf natürliche Weise zu reduzieren und Klimawandel abzuschwächen. Die Effizienz von Stadtbäumen bei der Erbringung dieser ÖSL ist jedoch nicht einheitlich und wird von baumspezifischen Faktoren beeinflusst, wie z.B. Art, Alter und Größe, Gesamtvitalität, Kronenstruktur, Blattmasse insgesamt und während des Jahresverlaufs. Hinzu kommen umgebungsspezifische Faktoren wie der Baumstandort (d.h. der Einfluss von Gebäuden, Straßen, anderen Infrastrukturelementen und benachbarten Bäumen oder die Bodenversiegelung und -charakteristika). Das Verständnis der komplexen Beziehungen zwischen diesen Variablen und den ÖSL von Stadtbäumen ist entscheidend für die Optimierung ihres Nutzens und die Förderung der städtischen Nachhaltigkeit.

Der Blattflächenindex LAI ("Leaf Area Index") ist dabei einer der wichtigsten Parameter für die Erfassung und Berechnung der ÖSL, insbesondere für ÖSL wie Kühlung oder Beschattungswirkung. Diese Studie untersucht, wie sich der LAI je nach Baumart im Jahresverlauf entwickelt und wie dies die Bereitstellung von ÖSL verschiedener Stadtbaumarten über den Verlauf eines Jahres hinweg an Stadtplätzen mit unterschiedlichen Bodenversiegelungswerten beeinflusst.

## Material und Methoden

In dieser Studie wird zunächst die Variation des LAI verschiedener Stadtbaumarten an öffentlichen Plätzen in München im Laufe eines Jahres analysiert. Dabei wurden sowohl der Astindex BAI ("Branch Area Index") vor Blattaustrieb, der Anstieg des LAI mit der Blattentfaltung und der maximalen Belaubung, als auch der Rückgang des LAI im Herbst erfasst. LAI und BAI wurden zerstörungsfrei mittels hemisphärischer Fotografie bestimmt. Insgesamt wurden 107 Stadtbäume fünf verschiedener Arten (55 *Tilia cordata*, 38 *Aesculus hippocastanum*, sieben *Acer pseudoplatanus*, fünf *Platanus x acerifolia* und zwei *Robinia pseudoacacia*) an acht öffentlichen Plätzen (Alter Hof, Erich-Mühsam-Platz, Habsburger Platz, Holzplatz, Marstallplatz, Rindermarkt, Pariser Platz, Pündterplatz) im Stadtgebiet von München untersucht. Die 14 Aufnahmetermine erstrecken sich von Ende März bis Ende Oktober 2019. Es wurde darauf geachtet, Plätze sowohl im Stadtzentrum als auch etwas außerhalb des Stadtzentrums auszuwählen, um Standorte im Einflussbereich des städtischen Wärmeinseleffekts zu berücksichtigen.

Nach Aufnahme der Fotos mit der Kamera Nikon D7500 mit hemisphärischem Objektiv wurden die Fotos mit dem Programm WinSCANOPY (Regens Instruments) ausgewertet. Das Programm

unterscheidet alle Pixel im Bild nach Himmel und Krone und bestimmt so den Anteil an Laub über dem entsprechenden Anteil an Bodenfläche. Die grafische Darstellung und statistischen Analysen wurden mit R durchgeführt (R Core Team 2020). Die Berechnung der spezifischen ÖSL wurden mit dem prozessorientierten Einzelbaummodell CityTree ausgeführt (Rötzer et al., 2019).

### Ergebnisse

Insgesamt zeigen die Ergebnisse eine deutliche artspezifische Entwicklung des LAI über das Jahr auf. Zu Beginn der Aufnahmen im März wurden die niedrigsten Werte für alle Arten erfasst. Da zu diesem Zeitpunkt noch keine Belaubung vorhanden war, entsprechen die Werte dem BAI. So wurde ein BAI von 0,3 bis 0,4 beobachtet (Abb. 1).

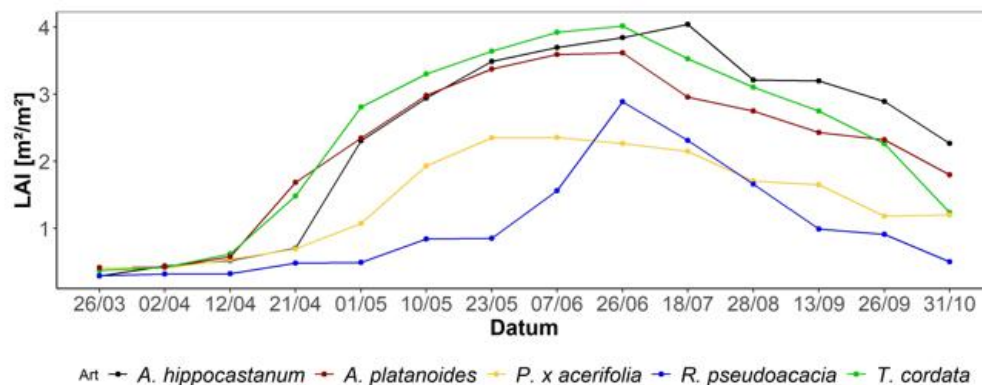


Abb. 1: Jahresverlauf des BAI/LAI für die fünf untersuchten Stadtbaumarten.

Bei *A. platanoides* und *T. cordata* stieg der LAI nach dem 12. April und bei *A. hippocastanum* nach dem 21. April steil an und erreichte Ende Juni bis Mitte Juli (26. Juni – 18. Juli) ein Maximum von 4.0 für *T. cordata* und *A. hippocastanum* sowie 3.6 für *A. platanoides*. Für *P. x acerifolia* und *R. pseudoacacia* wurde ein abweichender Verlauf beobachtet: Bei beiden Arten begann der Anstieg im Frühjahr später. Bei *P. x acerifolia* wurde bereits am 23. Mai der Höchstwert (2.4) erreicht, bevor der LAI Ende August wieder absank. Dagegen nahm der LAI von *R. pseudoacacia* im Laufe der Zeit nur geringfügig zu, mit einem starken Anstieg nach dem 23. Juni bis zu einem Höchstwert von 2,9 am 26. Juni.

Bei allen Arten wurde der höchste LAI im späten Frühjahr und frühen Sommer zwischen dem 23. Mai (*P. x acerifolia*), 26. Juni (*T. cordata*, *A. platanoides*, *R. pseudoacacia*) und 19. Juli (*A. hippocastanum*) beobachtet, wobei die höchsten LAI-Werte von 4.0 für *T. cordata* und *A. hippocastanum* gemessen wurden. Bei den meisten untersuchten Arten wurde nach den höchsten LAI-Werten im Sommer ein starker Rückgang beobachtet mit Ausnahme von *P. x acerifolia*, hier sank der LAI langsamer. Allerdings wurden für alle Arten zum Ende der Untersuchungen am 31. Oktober immer noch LAI-Werte von 0.5 bis 2,3 nachgewiesen, was vor allem an dem nicht abgeschlossenen Laubabwurf lag.

Die Unterschiede in der BAI-/LAI-Entwicklung der Arten an verschiedenen Standorten waren gering (Abb. 2). *R. pseudoacacia* kam nur am Marstallplatz vor. Für *A. hippocastanum* wurde am Habsburger Platz im Vergleich zum Holzplatz ein früherer Anstieg des LAI im Frühjahr festgestellt, dagegen war der maximale LAI am Holzplatz geringfügig höher. Der Verlauf des LAI von *A. platanoides* war an beiden Plätzen (Alter Hof, Holzplatz) ähnlich, nur war der LAI am Marstallplatz leicht höher als am Alten Hof. *T. cordata* kam an den meisten Standorten vor (Habsburger Platz, Marstallplatz, Rindermarkt, Holzplatz, Pariser Platz, Pündterplatz), wobei keine eindeutigen Muster zwischen den Standorten erkennbar sind. Insgesamt wurden die höchsten LAI-Werte am Pündterplatz und Rindermarkt gemessen, die niedrigsten Werte am Habsburgerplatz, jedoch sind die Unterschiede gering. Auch bei *P. x acerifolia* sind die Unterschiede der Bäume am Rindermarkt und Erich-Mühsam-Platz unwesentlich.

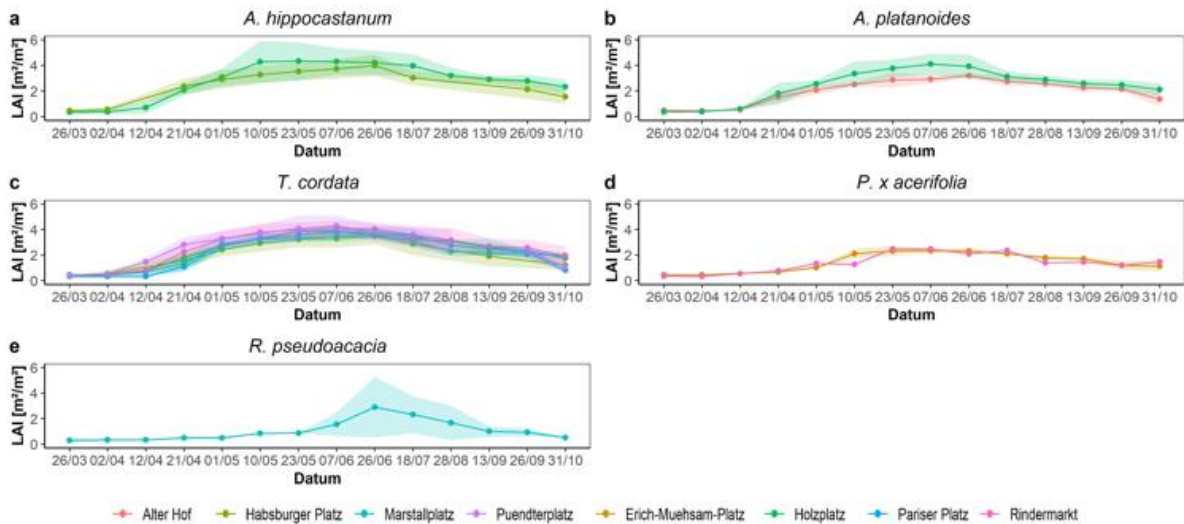


Abb. 2: Jahresverlauf des BAI/LAI an den Stadtplätzen in München für die untersuchten Stadtbaumarten.

*T. cordata*, *A. hippocastanum* und *A. platanoides* zeigen einen früheren Laubaustrieb als *R. pseudoacacia* und *P. x acerifolia*. Während für *T. cordata*, *A. hippocastanum* und *A. platanoides* am 2. April erste Bäume austrieben, wurden für *P. x acerifolia* am 12. April erste Blätter verzeichnet und für *R. pseudoacacia* am 21. April. Dies zeigen auch die phänologischen Beobachtungen des Deutschen Wetterdienstes (DWD 2023) für den Raum München, die für *T. cordata* einen mittleren Blattaustrieb am 25. April und für *R. pseudoacacia* am 6. Mai angeben. Für beide Arten wurde der Vergleichszeitraum 1980–1990 ausgewählt, da für spätere Jahre keine Angaben vorlagen. Dagegen wurden für *A. hippocastanum* und *A. platanoides* Daten für das Jahr 2019 gefunden, welche für *A. hippocastanum* den Laubaustrieb am 9. April (Mittel für 2010-2019: 14. April) und für *A. platanoides* den 1. April (Mittel für 2010-2019: 5. April) festlegten. Insbesondere für 2019 sind die Zeitpunkte durchaus vergleichbar.

Anschließend wurde eine Simulation mit prozessorientierten Wachstumsmodell CityTree (Rötzer et al., 2019) durchgeführt, anhand dessen die ÖSL von Stadtbäumen quantifiziert werden können. Es wurde untersucht, wie sich die ÖSL Zuwachs, Abfluss sowie Kühlung durch Transpiration und Beschattung verändern, wenn in das Modell gemessene LAI-Werte im Jahresverlauf eingegeben werden (Abb. 3).

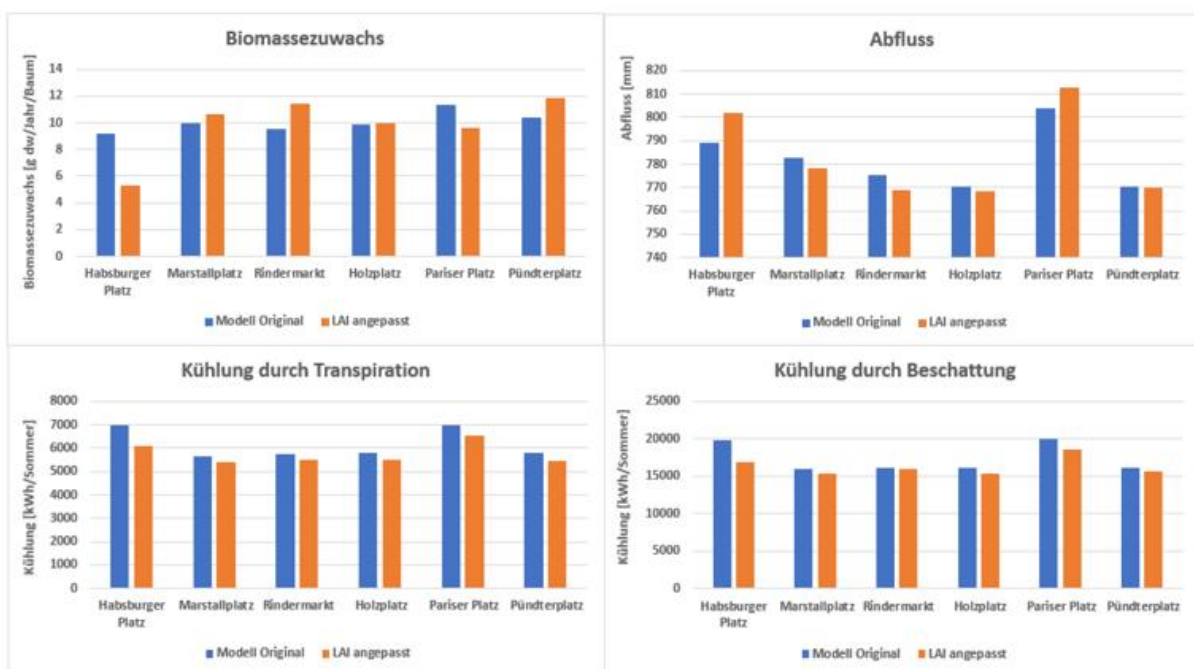


Abb. 3: Simulationen mit dem Modell CityTree (Rötzer et al., 2019) für *T. cordata* in München auf lehmigen Sand.

Für alle Plätze können Veränderungen festgestellt werden. Je nach Platz führt eine Anpassung des LAI-Jahresverlaufs mit den tatsächlich gemessenen Werten zu einer Steigerung der ÖSL (z.B. Biomasse Pünderplatz) oder zu einer Senkung der ÖSL (z.B. Beschattung Habsburger Platz). Insgesamt wurde zumeist eine Verringerung der erbrachten ÖSL beobachtet.

### Schlussfolgerung

Die Ergebnisse zeigten eine deutliche artspezifische Entwicklung des LAI über das Jahr. *T. cordata*, *A. hippocastanum* und *A. pseudoplatanus* wiesen den höchsten maximalen LAI auf, während *P. x acerifolia* und *R. pseudoacacia* niedrigere maximale LAI-Werte aufwiesen. Der Blattaustrieb erfolgte bei den schattentoleranten Arten *T. cordata*, *A. pseudoplatanus* und *A. hippocastanum* zu einem ähnlichen Termin um den 2. April, während er bei den lichtbedürftigen Arten *R. pseudoacacia* (21.04.) und *P. x acerifolia* deutlich später (12.04.) lag. Anschließend zeigten alle schattentoleranten Arten einen starken Anstieg des LAI bis zu einem Peak im Juni und Juli, während die lichtbedürftigen Arten einen verzögerten LAI-Anstieg zeigten mit geringeren LAI-Werten.

Zwischen den Standorten gab es überraschenderweise kaum Unterschiede im LAI. Dies zeigt, dass die insgesamt sehr hohen Bodenversiegelungswerte (von 86 % – 100 %) und der an allen Standorten vorhandene UHI-Effekt kaum nennenswerte Veränderungen in der Blattform und dem maximalen LAI bewirken. Nur gegen Ende der Aufnahmetermine konnte beobachtet werden, dass die Bäume an Plätzen mit geringerer Versiegelung (Holzplatz, Marstallplatz) im Oktober noch höhere LAI-Werte aufwiesen als Bäume an den extrem stark versiegelten Plätzen (Alter Hof, Pariser Platz). Diese gewonnenen Daten zum Verlauf des LAI über ein Jahr hinweg können eine wichtige Grundlage für die Berechnung von ÖSL wie Kühlung und Beschattung sein. Oftmals werden für die Berechnung von ÖSL nur die maximalen Werte des LAI im Sommer verwendet, allerdings zeigen Bäume wie in der Studie beschrieben, über das Jahr hinweg deutliche Abweichungen vom maximalen LAI. Hier können die erhaltenen Daten für genauere Ergebnisse der ÖSL genutzt werden, um eine bessere Modellanpassung bzw. Modellvalidierung zu erreichen. Weitere Studien zum Einfluss von Klimawandel und UHI auf die Länge der Vegetationsperiode, den Blattaustrieb und deren Zusammenhänge mit den ÖSL von Stadtbäumen sind für ein nachhaltiges Stadtbaummanagement notwendig, um Hitzeinseln in der Stadt entsprechend entgegenwirken zu können.

### Literatur:

- DEUTSCHER WETTERDIENST, DWD, 2023: Climate Data Center. Available online at <https://cdc.dwd.de/portal>
- HEAVISIDE, C., MACINTYRE, H., VARDOULAKIS, S., 2017: The Urban Heat Island: Implications for Health in a Changing Environment. *Current Environmental Health Reports* 4, 296-305.
- MEA, MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT, 2005: Millennium Ecosystem Assessment. Living beyond Our Means: Natural Assets and Human Well-Being, Washington D.C.
- OKE, T. R.; MILLS, G.; CHRISTEN, A.; VOOGT, J. A., 2017: Urban Climates. Cambridge University Press.
- PARSA, A. V., SALEHI, E., YAVARI, A. R. ET AL., 2019: Evaluating the potential contribution of urban ecosystem service to climate change mitigation. *Urban Ecosyst* 22, 989–1006.
- R CORE TEAM, 2020: R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Available online at <https://www.R-project.org/>
- RÖTZER, T., RAHMAN, M.A., MOSER-REISCHL, A., PAULEIT, S., PRETZSCH, H., 2019: Process based simulation of tree growth and ecosystem services of urban trees under present and future climate conditions. *Science of the Total Environment* 676:651-664.
- UN, 2018: World Urbanization Prospects: The 2018 Revision, Online Edition. Department of Economic and Social Affairs, United Nations, New York.

**Schlüsselwörter:** Blattaustrieb, Blattflächenindex, Ökosystemleistungen, Stadtbäume

## Wie stark „stören“ Stadtbäume nächtliche Kaltluftflüsse? Eine Modellstudie mit KLAM\_21 für die Stadt Plauen

*Valeri Goldberg, Kerstin Uiboupin*

TU Dresden, Professur Meteorologie (Deutschland)

Stadtbäume sind aufgrund ihrer Kühlwirkung ein wesentlicher Bestandteil grüner Infrastruktur zur Dämpfung der sommerlichen Hitzebelastung am Tage und damit ein gut geeignetes Mittel zur Umsetzung von Klimaanpassungskonzepten in Städten. In Sommernächten generieren jedoch Städte in Tallagen ihre Abkühlung v.a. durch die Zufuhr lokaler Kaltluft aus dem Umland. Hier muss deshalb bei der Anpflanzung von Stadtbäumen sorgfältiger geplant werden, da Bäume die Kaltluftströmungen abbremsen und damit die Abkühlung in den Stadtzentren verzögern bzw. abschwächen können. In der praktischen Umsetzung von Klimaanpassungskonzepten müssen Kommunen dann evtl. Vor- und Nachteile von Baumpflanzungen für das Stadtklima an speziellen Standorten abwägen.

Vor diesem Hintergrund wurden im Rahmen des BMBF Forschungsverbundes KlimaKonform für die Stadt Plauen (sächsisches Vogtland) Modellsimulationen mit dem Kaltluftabflussmodell KLAM\_21 (DWD) durchgeführt. Die Simulationen hatten zum Ziel, die potentiellen Auswirkungen von geplanten Baumpflanzungen im Stadtgebiet auf die nächtlichen Kaltluftflüsse zu bewerten.

Die Modellergebnisse zeigen, dass Baumpflanzungen räumlich eng begrenzt, insbesondere in bestimmten Leitbahnen mäßige Auswirkungen auf den Kaltluftvolumenstrom und damit die klimaökologische Ausgleichsleistung haben können. Für das gesamte Stadtgebiet betrachtet bleiben die Auswirkungen jedoch gering, so dass in einer ganzheitlichen Bewertung die Vorteile von Baumpflanzungen für das Stadtklima überwiegen.

Generell verdeutlichen die Ergebnisse die Funktion von Modellen für die klimaangepasste Stadtplanung. So können z.B. KLAM\_21-Simulationen einen Beitrag dazu leisten, die Bedingungen zu bestimmen, die für eine optimale Wirkung von Bäumen zur Klimaanpassung von Städten in Tallagen notwendig sind.

## Einblicke in die Herausforderungen kommunaler Klimaanpassung in der Bauleitplanung

*Denise Böhnke<sup>1,2</sup>, Joachim Vogt<sup>2</sup>, Mathias Jehling<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Bereich 4 - natürliche und gebaute Umwelt, Karlsruhe Institut für Technologie (KIT) (Deutschland)

<sup>2</sup>Institut für Regionalwissenschaft, Karlsruhe Institut für Technologie (KIT) (Deutschland)

<sup>3</sup>Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e. V. (Deutschland)

Städte und ihre Bewohner tragen weltweit betrachtet durch Ihren hohen Energiebedarf mit entsprechenden Treibhausgas-Emissionen besonders stark zum Klimawandel bei. Gleichzeitig sind Städte besonders vulnerabel gegenüber den Folgen des Klimawandels, insbesondere gegenüber Wetterextremen und der sommerlichen Überwärmung der Städte. Alarmierende Erkenntnisse eines Städtevergleichs, basierend auf den Projektionen einer 1.5°C-Erwärmung, lassen im Jahr 2050 klimatische Bedingungen in europäischen Städten erwarten, wie sie heute in 1000 km südlicher gelegenen Städten auftreten (Bastin et al., 2019). Das Klima in Offenbach 2050 wäre dementsprechend mit dem heutigen Klima in Rom vergleichbar.

Es ist daher notwendig, lokal sowie regional Städte und ihr Umland an die zu erwartenden Folgen anzupassen. Stadt- und Raumplanung sind dafür Schlüsselinstrumente, lokale Behörden als Umsetzende und Politiker als Richtungsgeber die verantwortlichen Akteure. Weltweit zeigen jedoch wissenschaftliche Untersuchungen zum Stand der kommunalen Klimaanpassung noch erhebliche Anpassungsdefizite. Diese Defizite reichen von fehlenden Informationen bzw. einer unzureichenden Datenbasis der Verwaltungen (Boehnke et al., 2022), zu fehlenden politischen Vorgaben zur Integration von Anpassungszielen im Verwaltungshandeln (Braunschweiger und Pütz, 2021) bis hin zu gänzlich fehlenden Aktivitäten zur Klimaanpassung – was 2021 bei 25% der untersuchten deutschen Städte beobachtet wurde (Otto et al., 2021).

Dieser Beitrag präsentiert die Ergebnisse einer Studie, bei dem die Wissenschaftler über 1.5 Jahre bei einem realen Bauleitplanungsprozess als beratende Klimaanpassungsexperten tätig waren. Unter Anwendung eines teilnehmenden Beobachtungsansatzes wurde zeitgleich untersucht, warum Planer bestimmte Maßnahmen nicht umsetzen wollten oder konnten und welche systemimmanenten Gründe die Klimaanpassung im Planungsprozess im Vergleich zu anderen Anliegen schwächen (Boehnke et al., 2023). Das Untersuchungsgebiet war ein etwa 20ha großes, neues Stadtquartier im Südwesten Deutschlands.

Aus biometeorologischer Perspektive ist in Städten die durch die Klimaerwärmung zunehmende, sommerliche Hitzebelastung von hoher Bedeutung. Dies gilt insbesondere für die heute warmen bis heißen Regionen, wozu auch das untersuchte Pilotgebiet zählt. Weitere Klimaanpassungsfelder sind aus den regionalen Klimaprojektionen zu entnehmen. Diese betreffen in Deutschland zumeist Wetterextreme wie langanhaltende Trockenheit, Starkregenereignisse und Stürme, und in Küstengegenden den steigenden Meeresspiegel – wie den zahlreichen deutschen Leitfäden zur Klimaanpassung zu entnehmen ist. Gleichzeitig bieten sich weitere Anpassungsfelder als auch Anpassungsoptionen aus den naturräumlichen und ökologischen Gegebenheiten des Untersuchungsraumes. In windarmen Städten bzw. Stadtquartieren haben innerstädtische Kaltluftentstehungsgebiete (unversiegelte Freiflächen) sowie ein möglichst ungestörtes Eindringen der Kaltluft in Siedlungsbereiche (z.B. durch eine angepasste Bebauungsstruktur) eine besonders hohe Bedeutung. Der Einsatz und die Gestalt von Maßnahmen zur Starkregenvorsorge wie die Anlage von Versickerungs- und multifunktionalen Flächen sowie die Auswirkungen langanhaltender Trockenheit hängen stark von der Beschaffenheit des Untergrundes im Plangebiet ab. Kommunales Niederschlagsmanagement muss daher zukünftig sowohl Zustände mit „zu viel und zu wenig Wasser“ berücksichtigen (Boehnke und Norra, 2021). Maßnahmen der Hitzeanpassung gehören überwiegend zur sogenannten blau-grünen Infrastruktur. Hier sind insbesondere Maßnahmen der Begrünung (Gebäude und Flächen) und Verschattung (durch Bäume) sowie die lokale Erhöhung des Wasseranteils (z.B. Teiche, Brunnen usw., Bodenfeuchte durch Versickerung, intensive Dachbegrünung) zu nennen, die gezielt im Plangebiet eingesetzt werden können.

Die Wirkung dieser wissenschaftlich und praktisch gut untersuchten Maßnahmen zur Klimaanpassung kann jedoch nur entfaltet werden, wenn diese konsequent in der Planung und Umsetzung neuer Baugebiete sowie in Sanierungen ein- und umgesetzt werden. Ob dies der Fall ist und welche Barrieren eine adäquate Implementierung von Maßnahmen während des Bauleitplanungsprozesses be- oder verhindern können, war eine der Forschungsfragen des Pilotprojektes.

Die beobachteten Hinderungsgründe für die Implementierung der Klimaanpassung in der Bauleitplanung konnten in 3 Kategorien eingeteilt werden. Diese Barrieren sind system-immanent, d.h. durch die Rahmenbedingungen der kommunalen Bauleitplanung bedingt. Darunter fallen I) organisatorisch-strukturelle Barrieren, die sich v.a. durch den Verwaltungsaufbau, die Rolle von Verantwortlichkeiten und ihre strikte Trennung nach Fachbereichen ableiten lassen; II) prozessuale Barrieren, die bei der Integration des neuen Abwägungsbelanges in bereits etablierte Prozesse und verwaltungsinterne Netzwerke zur Bauleitplanung auftreten und III) rechtliche Hinderungsgründe, die insbesondere auf die vergleichsweise schwache rechtliche Verankerung der Klimaanpassung im Baugesetzbuch zurückzuführen sind (Boehnke et al., 2023), (Vogt, 1998). Da die Gründe system-immanent sind, ist davon auszugehen, dass vergleichbare Hindernisse auch in anderen Städten mit ähnlichen Planungsvorschriften und Verwaltungsstrukturen auftreten.

Durch die vielen verschiedenen Belange, die bei der Planung zu berücksichtigen sind, treten neben Synergien auch diverse Zielkonflikte auf. Der Abwägungsprozess dient der Entscheidungsfindung, welche Belange letztlich bevorzugt behandelt und welche „weggewogen“ werden. Basis hierfür ist die rechtliche Verankerung des Belanges, aber auch die Stärke der Argumente einzelner Fachbereiche. Herausforderungen der Klimaanpassung sollen anhand zweier Kommentare der Bauleitplaner verdeutlicht werden:

- "Für mich sind Aussagen wie "es wird 5°C heißer" schwer einschätzbar. Was bedeutet das, welche Wertigkeit hat dieser Eingriff?" (Kontext: durch einen Neubau wird laut klimatologischem Gutachten eine Erwärmung um bis zu 5°C im Plangebiet prognostiziert)
- „Ich sag’s mal so, am Klimaschutz ist noch kein B-Plan gescheitert, am Lärmschutz schon! Oder anders ausgedrückt: Der Bebauungsplan kann sich über den Lärmschutz nicht hinwegsetzen, aber über die Klimaanpassung“

Verantwortlich für die Abwägung – und damit auch letztlich für die Ausgestaltung des B-Planes und Implementierung der Klimaanpassung - sind zumeist Gesamt- bzw. Bauleitplaner der Stadtverwaltung. Die oben genannten Argumente deuten den hohen Spielraum an, mit dem Planer derzeit die Klimaanpassung argumentativ abwägen können. Gleichzeitig stellte sich heraus, dass durch eine schwache rechtliche als auch politische Verankerung des Themas die Planer auch bei bestem Willen nicht alle Maßnahmen umsetzen könnten, da diese gegenüber stärkeren Belangen oder durch das „Grundrecht auf Bau- und Eigentumsfreiheit“ (GG) einfach zu umgehen seien. Eine weitere wichtige Erkenntnis der Projektes war, dass der Planungsprozess einerseits der Optimierung der Planung dient, gleichzeitig aber der Planungsprozess selbst Ziel der Optimierung der Planenden ist. Die Suche nach schnell umzusetzenden, unkomplizierten Lösungen und die Zusammenarbeit in gut funktionierenden Netzwerken sind die Folge – wodurch bestimmte Themen indirekt bevorzugt werden. Benachteiligt werden v.a. Abteilungen und deren Themen, die nicht freiwillig in den informellen Planungsprozess, sondern nur zu formalen Prozessschritten eingebunden werden. Gründe hierfür können z.B. politisch konträr orientierte Abteilungsleitungen sein.

Aus biometeorologischer bzw. gutachterlicher Sicht ist vor allem die Aussage, dass „5°C mehr schwer einschätzbar sind“, von hohem Interesse. Gegenüber Angaben zur Veränderung der (Luft-)Temperatur beziehen biometeorologische Indizes weitere Faktoren wie die Wirkung der Sonneneinstrahlung und Luftfeuchte auf den menschlichen Organismus mit ein, und lassen Rückschlüsse auf die Hitze-Belastung der sich dort aufhaltenden Personen zu. Diese „Übersetzung“ der Lufttemperaturänderungen in Belastungsindizes könnte die Klimaanpassung im Abwägungsprozess deutlich stärken. Darüber hinaus würde die Umwandlung von einer begrünten Freifläche mit altem Baumbestand in ein neues Wohnhaus mit geringem Gartenanteil biometeorologisch auch die Beschattungsleistung des alten Baumbestandes

umfassen – wodurch die reine Temperaturveränderung durch den Neubau durch die fehlende Beschattung ergänzt würde, was zu deutlich schlechteren bzw. höherer Belastungswerten führt. Dieser wurde in zahlreichen Untersuchungen innerhalb des stadtökologischen Praktikums am KIT belegt. Es ist daher zu empfehlen, biometeorologische Indizes standardmäßig in klimatologischen Gutachten für die kommunale Bauleitplanung zu verwenden.

**Literatur:**

BASTIN, J.-F., CLARK, E., ELLIOTT, T., HART, S., VAN DEN HOOGEN, J., HORDIJK, I., MA, H., MAJUMDER, S., MANOLI, G., MASCHLER, J., MO, L., ROUTH, D., YU, K., ZOHNER, C.M., CROWTHER, T.W., 2019. Understanding climate change from a global analysis of city analogues. *PloS one* **14**, 7, 1-13.

BOEHNKE, D., JEHLING, M., VOGT, J., 2023. What hinders climate adaptation? Approaching barriers in municipal land use planning through participant observation. *Land Use Policy* **132**, 1–10.

BOEHNKE, D., KREHL, A., MÖRMANN, K., VOLK, R., LÜTZKENDORF, T., NABER, E., BECKER, R., NORRA, S., 2022. Mapping Urban Green and Its Ecosystem Services at Microscale—A Methodological Approach for Climate Adaptation and Biodiversity. *Sustainability* **14**, 15, 1–28.

BÖHNKE, D., NORRA, S., 2021. Stadtquartiere im Wandel, Kommunales Niederschlagsmanagement in Bestand und Neubau - Erkenntnisse praxisnaher Forschung. *Transforming cities* **3**, 34-39.

BRAUNSCHWEIGER, D., PÜTZ, M., 2021. Climate adaptation in practice: How mainstreaming strategies matter for policy integration. *Environmental Policy and Governance* **31**, 4, 361–373.

OTTO, A., KERN, K., HAUPT, W., ECKERSLEY, P., THIEKEN, A.H., 2021. Ranking local climate policy: assessing the mitigation and adaptation activities of 104 German cities. *Climatic Change* **167** (1-2).

VOGT, J., 1998. Konsequenzen stadtökologischer Handlungsorientierung für die Aufbau- und Ablauforganisation kommunaler Verwaltungen. *Luzerner Stadtökologische Studien* **9**, Luzern.

**Schlüsselwörter:** Kommunale Klimaanpassung, Barrieren, Bauleitplanung, biometeorologische Indizes

## Downscaling von Klimaprojektionen zur Abschätzung der zukünftigen thermischen Belastung in Städten auf der Grundlage eines Deep-Learning-Ansatzes

*Ferdinand Briegel<sup>1</sup>, Markus Sulzer<sup>1</sup>, Simon Schrod<sup>2</sup>, Thomas Brox<sup>2</sup>, Andreas Christen<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Professur für Umweltmeteorologie, Fakultät für Umwelt und Natürliche Ressourcen, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Freiburg im Breisgau (Deutschland)

<sup>2</sup>Professur für Mustererkennung und Bildverarbeitung, Technische Fakultät, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Freiburg im Breisgau (Deutschland)

Die thermische Belastung des Menschen wird durch verschiedene Faktoren wie Lufttemperatur ( $T_a$ ), Luftfeuchtigkeit (RH), die mittlere Strahlungstemperatur ( $T_{mrt}$ ) und die lokale Windgeschwindigkeit ( $U$ ) beeinflusst, welche in Städten sehr kleinräumig variieren. Das macht deren Modellierung und Vorhersage zu einem komplexen und vielschichtigen mikrometeorologischen Problem. Das Zusammenwirken dieser Größen auf die thermische Belastung des Menschen in Außenräumen wird durch Indizes wie beispielsweise den Universal Thermal Climate Index (UTCI) quantifiziert (Blażejczyk et al., 2013).

Für die Modellierung der einzelnen Größen, welche den UTCI bestimmen, wurden bisher verschiedene (numerische) Modellierungsansätze verwendet, die allesamt aber aufwändig und rechenintensiv sind. Die bisherige Forschung und Anwendung zum thermischen Komfort im Freien konzentrierte sich daher vor allem auf Fallstudien zu einzelnen Stadtvierteln oder Punkten im Raum, auf begrenzte Zeiträume oder sogar einzelne Tage, auf kleine Modellgebiete und oft nur auf  $T_a$  oder  $T_{mrt}$ . Fallstudien, die sich auf die zeitliche Dimension konzentrieren und dabei die thermische Behaglichkeit über lange Zeiträume modellieren bzw. Klimaprojektionen herunterskalieren, sind in ihrer räumlichen Dimension begrenzt. Andererseits sind Studien, die sich auf eine hohe räumliche Auflösung und/oder größere Modellgebiete konzentrieren, auf kurze exemplarische Zeiträume beschränkt. Obwohl eine Kombination von Langzeitmodellierung an einem generischen Punkt und räumlicher Modellierung für Extremereignisse durchgeführt wurde, war eine Kombination von hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung über große Modellgebiete aufgrund begrenzter Rechenleistung oder unverhältnismäßig hohem Rechenaufwand bisher nicht möglich.

Um diese zeitlichen und räumlichen Unzulänglichkeiten von prozessbasierten numerischen Stadtklimamodellen zu überwinden, wurde kürzlich ein kombiniertes Modell aus verschiedenen Machine- und Deep-Learning-basierten Teilmodellen vorgestellt, um in einem ersten Schritt  $T_a$ ,  $U$ , RH und  $T_{mrt}$  einzeln zu modellieren und in einem zweiten Schritt den thermischen Komfort (UTCI) im Freien zu bestimmen (Briegel et al., 2023b). Dazu wurden numerische Stadtklimamodelle durch Machine- und Deep-Learning Modelle approximiert (Briegel et al., 2023a). Das sogenannte Human Thermal Comfort Neural Network (HTC-NN) modelliert den Universal Thermal Climate Index (UTCI) in komplexen städtischen Gebieten mit vergleichbarer Genauigkeit zu prozessbasierten Stadtklimamodellen, ist diesen aber rechnerisch überlegen. Das HTC-NN ermöglicht eine hochauflösende stadtweite Langzeitbewertung von Klimawirkungen auf verschiedenen Skalen mit vertretbarem Rechenaufwand.

Auf dieser Konferenz stellen wir ein weiterentwickeltes, noch recheneffizientes Deep-Learning-Modell vor - das Unified Human Thermal Comfort Neural Network (UHTC-NN). Das Modell basiert auf den vorangegangenen Entwicklungen von Briegel et al. (2023b). Das UHTC-NN wurde basierend auf dem HTC-NN trainiert, nutzt jedoch nur eine einzelne Deep-Learning-Architektur zur Modellierung des UTCI, die die Verwendung von physikalischen oder statistischen Untermodellen vermeidet. Mit dem UHTC-NN können hochauflösende Karten des UTCI auf Straßenebene für ganze Städte auf der Basis regionaler meteorologischer Datenreihen sehr recheneffizient berechnet werden. Die Recheneffizienz des UHTC-NN erlaubt Klimaprojektionen und Klimastatistiken für ganze Städte basierend auf mehreren Klimamodellen bzw. Ensembles räumlich hochauflösend zu erstellen.

Als eine Beispiels-Anwendung werden 15 Klimaprojektionen (EURO-CORDEX – Jacob et al., 2014) mit einer 3-Stunden-Auflösung über einen Zeitraum von 30 Jahren mit dem UHTC-NN auf Straßenebene herunterskaliert, um hochauflösende (1x1 m) Karten des thermischen Komforts in der Stadt Freiburg

zu erstellen. Dabei werden drei verschiedene Representative Concentration Pathways (RCP) für die Jahre 2070-2099 mit dem historischen Klima aus herunterskalierten Reanalysedaten (ERA-5 - Muñoz Sabater, 2021) für die Jahre 1970-1999 verglichen. Die Klimaszenarien werden einer Fehlerkorrektur unterzogen, dem Quantile Data Mapping (Fauzi et al., 2020; Qian and Chang, 2021).

Erste, vorläufige Ergebnisse mit Daten der regionalen Klimamodelle zeigen, dass in der Stadt Freiburg die durchschnittliche Anzahl der Stunden pro Jahr mit starker bis extremer Hitzebelastung (UTCI  $\geq 32^{\circ}\text{C}$ ) für RCP 2.6 bzw. RCP 8.5 um das Dreifache bzw. Sechsfache ansteigen wird. Die Anzahl der Nachtstunden mit einem UTCI  $\geq 20^{\circ}\text{C}$  wird im Vergleich zum Zeitraum 1970-1999 (RCP 2.6 und 8.5) um das Zwei- bzw. Fünffache ansteigen. Abbildung 1 zeigt einen Ausschnitt der Stadt Freiburg und die Anzahl der Stunden pro Pixel und Jahr mit einem UTCI  $\geq 32^{\circ}\text{C}$ . Für das RCP2.6 Szenario können nur moderate Anstiege der Stunden beobachtet werden, wohingegen für das RCP8.5 extreme Anstiege ersichtlich sind. Darüber hinaus lässt sich gut erkennen, dass die Anstiege nicht gleich sind für die verschiedenen Pixel, was es erlaubt, Rückschlüsse zu ziehen, was den Anstieg vermindern kann.

### Hours per year with UTCI $\geq 32^{\circ}\text{C}$ ( $\geq$ strong heat stress)

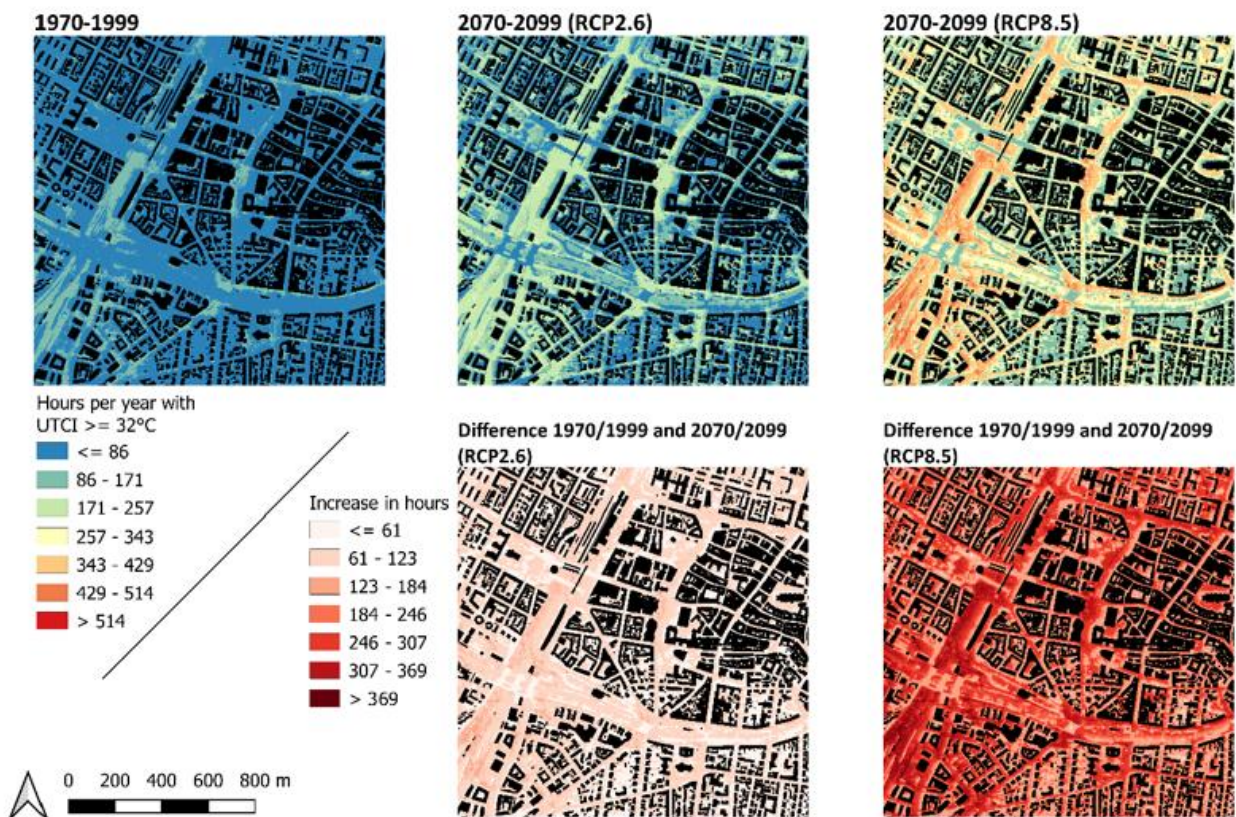


Abb. 1: Vorläufige Ergebnisse des UHTC-NN Modells. Die Karte zeigt die Anzahl Stunden pro Jahr mit einem UTCI  $\geq 32^{\circ}\text{C}$  (entspricht  $\geq$  starkem Hitzestress) für einen 1.5x1.5 km großen Ausschnitt der Stadt Freiburg für historische Daten (1970-1999) und Klimaszenarien der RCP's 2.6 und 8.5 für die Jahre 2070-2099.

Abbildung 2 zeigt die Verteilungen der UTCI Werte aus den Kartengebiet aus Abbildung 1. Diese Abbildung zeigt, wie sich die Verteilungen verschieben, aber auch flacher werden. Das 80. Perzentil verschiebt sich um 2°C bzw. 4°C für das RCP2.6 und das RCP8.5.

Das UHTC-NN erlaubt neue Anwendungen der städtischen Modellierung des thermischen Komforts mit hoher räumlicher als auch zeitlicher Auflösung. Außerdem können ganze Klima-Ensembles, städtebauliche Szenarien und Optimierungs-Anwendungen in kurzer Zeit gerechnet werden.

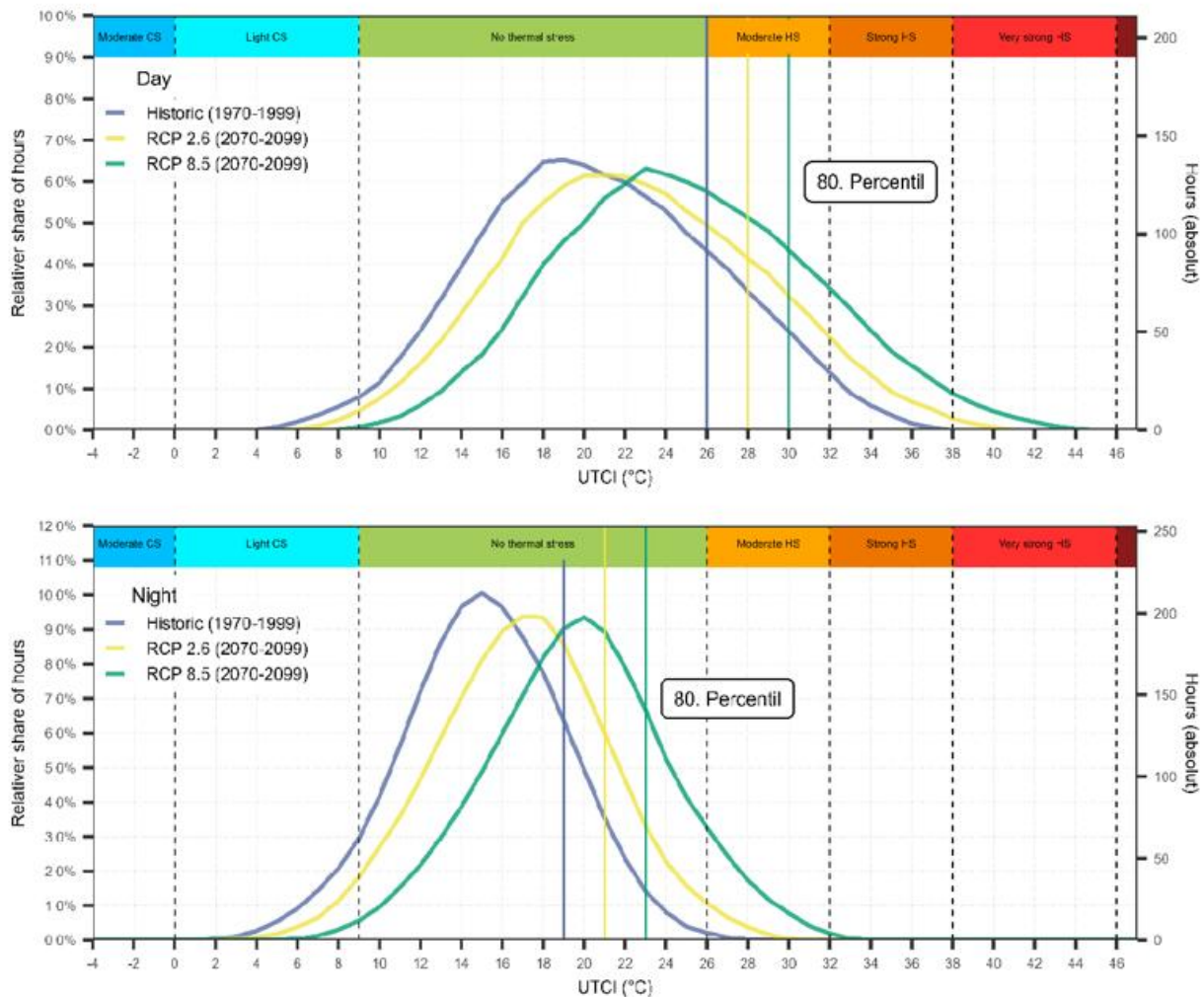


Abb. 2: Verteilungen der UTCI-Werte der aufgeteilt nach Tag (a) und Nacht (b) der historischen Daten und der Klimaszenarien.

#### Literatur:

- BRIEGEL, F., MAKANSI, O., BROX, T., MATZARAKIS, A., CHRISTEN, A., 2023a. Modelling long-term thermal comfort conditions in urban environments using a deep convolutional encoder-decoder as a computational shortcut. *Urban Clim* 47, 101359. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101359>
- BRIEGEL, F., WEHRLE, J., SCHINDLER, D., CHRISTEN, A., 2023b. High-resolution multi-scaling of outdoor human thermal comfort and its intra-urban variability based on a machine learning approach. *Geoscientific Model Development Discussions* 1–31. <https://doi.org/10.5194/gmd-2023-122>
- FAUFI, F., KUSWANTO, H., ATOKK, R.M., 2020. Bias correction and statistical downscaling of earth system models using quantile delta mapping (QDM) and bias correction constructed analogues with quantile mapping reordering (BCCAQ). *J Phys Conf Ser* 1538, 12050. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1538/1/012050>

JACOB, D., PETERSEN J., EGGERT, B., ALIAS, A., CHRISTENSEN, O.B., BOUWER, L.M., BRAUN, A., COLETTE, A., DEQUE, M., GEORGIEVSKI, G., GEORGOPOU, E., GOBIET, A., MENUT, L., NIKULIN G., HAENSLER, A., HEMPELMANN N., JONES, C., KEULER, K., KOVATS, S., KRÖNER, N., KOTLARSKI, S., KRIEGSMANN, A., MARTIN, E., van MEIJGAARD, E., MOSELEY, C., PFEIFER, S., PREUSCHMANN, S., RADERMACHER, C., RADTKE, K., RECHID, D., ROUNSEVELLI, M., SAMUELSSON, P., SOMOT, S., SOUSSANA, J.-F., TEICHMANN, C., VALENTINI R., VAUTARD, R., WEBER, B., YIOU P., 2014. EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Reg Environ Change* 14, 563–578. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>

MUNOZ SABATER, J., 2021. ERA5-Land hourly data from 1950 to 1980. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). (Accessed on < 20-04-2022 >), 10.24381/cds.e2161bac.

QIAN, W., CHANG, H.H., 2021. Projecting Health Impacts of Future Temperature: A Comparison of Quantile-Mapping Bias-Correction Methods. *Int J Environ Res Public Health* 18. <https://doi.org/10.3390/ijerph18041992>

**Schlüsselwörter:** Urban climate modelling, climate change scenarios, UTCI, machine learning, thermal comfort

## In welchem Stadtquartier ist die Hitzebelastung geringer? - Modell- und Messergebnisse aus einem Erfurter Gründerzeitviertel und einem Dresdener Plattenbaugebiet

*Astrid Ziemann, Valeri Goldberg, Uta Moderow*

Technische Universität Dresden, Professur Meteorologie, Piener Str. 23, 01737 Tharandt (Deutschland)

Wo ist die Hitzebelastung für die Stadtbewohner am größten? Wie können sich Städte an eine zunehmende sommerliche Hitzebelastung anpassen? Diese Fragen sind im Zusammenhang mit den lokalen Auswirkungen des Klimawandels u.a. für die Stadtplanung von Interesse, um Städte auch künftig lebenswert zu gestalten. In diesem Zusammenhang steigen der Bedarf und die Nachfrage von kommunalen Behörden an räumlich und zeitlich hochaufgelösten meteorologischen Daten und Informationen zur thermischen Belastung in Stadtquartieren.

Im Rahmen des BMBF Verbundprojektes HeatResilientCity (<http://heatresilientcity.de>) wurden in den vergangenen fünf Jahren die meteorologischen und humanbiometeorologischen Wirkungen in unterschiedlichen Stadtquartieren bei Hitzebelastung untersucht. Zu den Beispielquartieren zählt das Plattenbauviertel Dresden-Gorbitz, das in den 1980er Jahren entstand und relativ offen bebaut und durchgrünt ist. Die demographische Struktur bedingt eine erhöhte Verletzlichkeit der Bevölkerung gegenüber Hitze in diesem Stadtviertel. Das Gründerzeitviertel in der Erfurter Oststadt ist durch eine baulich verdichtete und versiegelte Struktur gekennzeichnet. Die Quartiersbewohner können dadurch vor allem nachts einem erhöhten Risiko thermischer Belastung ausgesetzt sein. Der Beitrag stellt die Gemeinsamkeiten und Unterschiede der sommerlichen Hitzebelastung in den beiden Stadtquartieren vor und bewertet die Ursachen.

Dazu wurden meteorologische Messungen mit einem Messrucksack in Dresden-Gorbitz und der Erfurter Oststadt durchgeführt, um die thermische Belastung eines Fußgängers abzuleiten. Die Messungen erfolgten an Sommertagen jeweils auf einem ca. 4 km langen Rundkurs vorbei an häufig frequentierten Orten (u.a. Schule, KiTa, Park) in den Quartieren mit grüner und grauer Infrastruktur unterschiedlicher Eigenschaften.

Um die Messergebnisse in ihrer raum-zeitlichen Struktur zu erweitern und einen direkteren Vergleich der Hitzebelastung in den beiden Quartieren zu ermöglichen, wurden diverse Simulationen mit dem Stadtklimamodell ENVI-met durchgeführt. Mit den Modellsimulationen können, wie in einem virtuellen Labor, verschiedene Landnutzungsparameter und meteorologische Bedingungen untersucht und in ihrer Wirkung auf das Stadtklima und die Hitzebelastung quantifiziert werden. Damit legen die Modellergebnisse auch eine wichtige Grundlage, um geeignete Anpassungsmaßnahmen an sommerliche Hitzeperioden zu entwickeln und vorab in ihrer Wirksamkeit zu testen. Einige bereits umgesetzte bzw. geplante „Best Practice“ Beispiele aus beiden Quartieren werden im Beitrag vorgestellt.

**Schlüsselwörter:** Human-Biometeorologie, Hitzebelastung, Stadtklima, Anpassungsmaßnahmen

## Darstellung von Bäumen in numerischen Simulationen und ihre Wirkung auf die thermische Behaglichkeit

*Ronald Queck<sup>1</sup>, Anne Bienert<sup>2</sup>, Elena Graumann<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Technische Universität Dresden, Institut f. Hydrologie u. Meteorologie, Professur Meteorologie (Deutschland)

<sup>2</sup>Technische Universität Dresden, Institut f. Photogrammetrie u. Fernerkundung, Professur Photogrammetrie (Deutschland)

Die Erhöhung des Baumbestandes in Städten zählt zu den wirksamsten Maßnahmen gegen die zunehmende Erwärmung in Städten. In Hinsicht auf den thermischen Wirkungskomplex haben die bessere Verschattung und die Verdunstung aber auch eine Verringerung der Belüftung zur Folge. Durch Bäume wird am Tage die Strahlungsbelastung auf Freiflächen verringert, aber auch die Ventilation, d.h. der Austausch sensibler Wärme wird eingeschränkt. In der Nacht verhindern Baumkronen zusätzlich die Ausstrahlung der über den Tag gespeicherten Energie.

Untersuchungen der verschiedenen Einflüsse auf das Stadtklima durch numerische Simulationen sind stark von der Repräsentation der Bäume im Modell abhängig. Qualität und Vollständigkeit sind entscheidend. Bisherige Vergleiche zwischen numerischen Simulationen der turbulenten Strömung, Windkanalexperimenten sowie umfangreichen Feldmessungen ergaben für einen Waldbestand grundlegende Verbesserungen der Simulationsergebnisse bei Verwendung räumlich differenzierter Vegetationsmodelle (Queck et al., 2015).

Die vorgestellte Arbeit zeigt, dass mit Hilfe von airborne Laserscanning vollständigere Vegetationsmodelle erstellt werden können. Die Qualität der Einzelbaummodelle ist jedoch noch eingeschränkt. Zum Vergleich und als Referenz wurden 6 Straßenzüge in Dresden mit terrestrischen Laserscannern vermessen, die aufgrund der geringeren Entfernung zum Objekt eine deutlich höhere Auflösung haben.

Aus im öffentlichen Dienst verfügbaren Daten und den Daten aus den Laserscanner-Vermessungen wurden verschiedene Vegetationsmodelle mit Auflösungen zwischen 10 m und 0.5 m Gitterweite erstellt. In numerischen Simulationen mit PALM-4U ließ sich dann die Wirkung der verschiedenen Vegetationsmodelle auf die Güte simulierter meteorologischer Größen und auf den thermischen Wirkungskomplex beobachten. Als Referenzdaten dienten hier mobile Messungen von Strahlungskomponenten, Temperatur, Feuchte und Wind.

## Outdoor human thermal comfort under contrasting tree species shade and climatic conditions

*Mohammad A. Rahman<sup>1</sup>, Astrid Moser-Reisch<sup>2</sup>, Thomas Rötzer<sup>2</sup>, Stephan Paule<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Strategic Landscape Planning and Management, School of Life Sciences, Weihenstephan, Technische Universität München, Emil-Ramann-Str. 6, 85354 Freising (Germany)

<sup>2</sup>Forest Growth and Yield Science, School of Life Sciences, Weihenstephan, Technische Universität München, Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 2, 85354 Freising (Germany)

Impact of global climate change and local urbanization have led our cities to bear unbearable heat loads. Urban green infrastructure, in particular, urban trees have already proved to have significant mitigation potentials by alleviating urban heat island (UHI) and thus heat stress for humans. However, a detailed understanding on the mechanisms of tree's cooling effect under different climatic conditions is still limited. We investigated surface energy balance, boundary layer air-cooling through evapotranspiration and the physiological equivalent temperature (PET) within a small-scale experiment in the sub-urban area Freising, close to Munich during hot summer days of the year 2020 including wet and dry spells. Six sites including grass lawns and paved surfaces, with or without the shade of trees and buildings were selected. We found strong positive relationships between PET and surface temperature (ST) during the wet spells compared to dry spells and for grass surfaces compared to paved surfaces. Overall, shade reduced 15 °C, 2 °C and 13 °C of ST, air temperature and PET respectively compared to sunny sites. Moreover, compared to the building shade, tree shade additionally reduced PET by 1 °C and 1.6 °C during wet and dry spells respectively. These findings have significant implications in terms of understanding the importance of both shade and grass surfaces in improving outdoor thermal comfort, in particular, the added benefits of tree shade compared to other types of shade. However, to understand the influence of species characteristics, we designed a separate experiment in Würzburg during the hottest summer days of 2018 (July 23 to 31) under the shade of two contrasting species: *Tilia cordata* and *Robinia pseudoacacia* compared to the sunny sites. With 35% higher leaf area index, *T. cordata* tree canopies prevented higher incoming radiation compared to *R. pseudoacacia* trees. Moreover, with diffuse porous wood anatomy, *T. cordata* trees provided four times more transpiration compared to *R. pseudoacacia*. Thus, PET reduction was up to 4 °C under the shade of a *R. pseudoacacia* compared to 11 °C under a *T. cordata*. These findings further the importance of species selection to optimize human comfort within the valuable landscapes of our cities.

## Klima- und Gesundheitseffekte unterschiedlicher urbaner Waldstrukturen

*Jonathan Simon<sup>1</sup>, Joachim Rathmann<sup>2</sup>, Elisabeth André<sup>3</sup>, Bhargavi Mahesh<sup>3</sup>, Yekta Said Can<sup>3</sup>, Michael Dietz<sup>3</sup>, Max Stocker<sup>1</sup>, Andreas Philipp<sup>1</sup>, Christoph Beck<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Universität Augsburg, Institut für Geographie, Lehrstuhl für physische Geographie mit Schwerpunkt Klimaforschung, 86135 Augsburg (Deutschland)

<sup>2</sup>Universität Würzburg, Institut für Geographie und Geologie, Lehrstuhl für Geographie und Regionalforschung, 97074 Würzburg (Deutschland)

<sup>3</sup>Universität Augsburg, Institut für Informatik, Lehrstuhl für menschenzentrierte künstliche Intelligenz, 86135 Augsburg (Deutschland)

Urbane Wälder sind eine bedeutende Ressource für die menschliche Gesundheit, denn sie erbringen eine Vielzahl wichtiger Ökosystemleistungen (ÖSL), darunter die Verbesserung der Luftqualität, die Senkung der Lufttemperatur, die Bindung von CO<sub>2</sub>, die Bereitstellung von Lebensräumen, den Schutz vor Erosion, die Filtration von Wasser und die Förderung der Erholung. Jedoch variieren die ÖSL urbaner Wälder in Bezug auf die Baumartenzusammensetzung, die Altersstruktur des Bestandes, die Lichtverhältnisse, die Artenvielfalt und die Bestandsdichte (Grammatikopoulou und Vačkářová, 2021). In der Öffentlichkeit und Politik steht der Wald als Gesundheitsressource, aber auch unter dem Aspekt seiner zunehmenden Gefährdung im Fokus. Auf der einen Seite nehmen Angebote zu verschiedenen Formen einer Waldtherapie und des bewussten Erlebens des Waldes (Waldbaden) zu, auf der anderen Seite stehen Schlagzeilen zu Trockenstress, Fichtensterben, Borkenkäferbefall und großflächigen Waldbränden. Somit ist es erforderlich die vielfältigen ÖSL in ihrem Zusammenspiel und in Abhängigkeit der Waldstruktur zu untersuchen und zu bewerten. Jedoch ist ungeklärt, inwieweit sich verschiedene urbane und periurbane Wälder hinsichtlich ihrer ÖSL unterscheiden und welche Waldkomponenten beispielsweise den größten Einfluss auf das sie umgebende Mikroklima oder das Wohlbefinden des Menschen haben (Karim et al., 2020). Gerade dies ist jedoch für die Erarbeitung und Bewertung waldbaulicher Entwicklungsszenarien unter Klimawandelbedingungen dringend geboten.

Wälder haben eine ausgleichende Wirkung auf die thermische Situation (Demuzere et al., 2014; Livesley et al., 2016). Zu den Umweltvariablen, die das Wärmeempfinden von Menschen beeinflussen, gehören die Umgebungstemperatur, die Strahlungstemperatur, die Luftfeuchtigkeit und die Windgeschwindigkeit (Fanger, 1972). Dagegen sind der Stoffwechsel, die Hauttemperatur, der Blutfluss und die Schweißproduktion die wichtigsten physiologischen Steuergrößen für Energiehaushalt und Wärmeempfinden des Körpers. Diese werden zum einen durch die Umweltvariablen direkt beeinflusst, sind zum anderen aber auch von individuellen Faktoren wie körperlicher Fitness und Bekleidung abhängig (Dzyuban et al., 2022; Vanos et al., 2010). Darüber hinaus wird das thermische Empfinden von weiteren physiologischen, psychologischen und kontextualen Faktoren wie Demografie, Kultur, Erwartungshaltungen, vergangenen thermischen Erfahrungen und der subjektiven Wahrnehmung der Umgebung beeinflusst. Im Rahmen von „thermal walks“ lassen sich die mikroklimatischen Charakteristika, die objektiven Gesundheitswirkungen und das subjektiv empfundene Wohlbefinden in einer Umgebung quantifizieren. Liu et al. (2021) führten „thermal walks“ in drei verschiedenen Waldtypen und in einem urbanen Gebiet durch und erfassten dabei sowohl objektive physiologische Daten als auch subjektive Eindrücke. Gillerot et al. (2024) exponierten Probandinnen und Probanden sitzend in drei verschiedenen Waldtypen und erfassten das subjektive thermische Empfinden und die Cortisol-Spiegel der Probandinnen und Probanden als Indikator für den Stresslevel. Klimavariablen wurden in beiden vorgenannten Studien allerdings nur punktuell und nicht mobil entlang der Routen erfasst. Unsere Studie hat daher zum Ziel, die Mikroklimata verschiedener urbaner Waldstrukturen messtechnisch sowohl langfristig-stationär als auch tagesspezifisch-mobil zu erfassen und modellgestützt zu quantifizieren als auch die objektive Gesundheitswirkung und das subjektive Wohlbefinden, das diese Areale ermöglichen, einzuschätzen und alle Komponenten miteinander zu verbinden.

In vier Untersuchungsgebieten im Stadtgebiet und im Stadtwald von Augsburg wurden im Juli 2023 an insgesamt zehn Terminen im Zeitfenster von ca. 14:15 Uhr bis 15:15 Uhr Ortszeit etwa halbstündige

„thermal walks“ mit Studienteilnehmerinnen und -teilnehmern durchgeführt. Die Untersuchungsgebiete unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Wald- bzw. Grünstruktur und beinhalten einen städtischen Park (Wittelsbacher Park), ein Wohnviertel (Antonsviertel), einen Mischwald (Galgenablass) und eine Heidelandschaft (Schießplatzheide). An allen Terminen wurden entlang vordefinierter Routen u.a. mittels Kestrel 5400 Heat Stress Trackern, die in einer Höhe von ca. 1,80 m an selbst konstruierten Messrucksäcken angebracht waren, mobile Klimamessungen durchgeführt und wichtige Klimavariablen wie Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Strahlungstemperatur und Windbedingungen erfasst. Gleichzeitig wurden Daten zu humanphysiologischen Effekten gesammelt, indem die Studienteilnehmerinnen und -teilnehmer mit tragbaren Sensoren ausgestattet wurden, die physiologische Daten wie ihre Herzaktivität aufzeichneten. Weiterhin wurden bei allen Teilnehmerinnen und Teilnehmern vor und nach den Spaziergängen Messungen des systolischen und diastolischen Blutdrucks, sowie Aufmerksamkeitstests durchgeführt. Mithilfe von Fragebögen wurden ergänzende soziodemografische Daten und die subjektiven Wahrnehmungen der Teilnehmerinnen und Teilnehmer hinsichtlich thermischer und visueller Empfindungen während der Spaziergänge erfasst. In zwei weiteren Untersuchungsgebieten (buchendominierter Mischwald, Kiefernwald) wurden zu diesen Terminen ebenfalls mobile Klimamessungen analog zu den restlichen Gebieten durchgeführt. Die Mikroklimata einiger der Untersuchungsgebiete wurden zusätzlich mit dem Mikroklimamodell ENVI-met (Bruse, 2018) modelliert.

Zunächst ließ sich feststellen, dass sich fast alle Gebiete signifikant in ihren klimatischen Eigenschaften unterscheiden. Abbildung 1 stellt dies beispielhaft für die Lufttemperatur in den Untersuchungsgebieten dar.

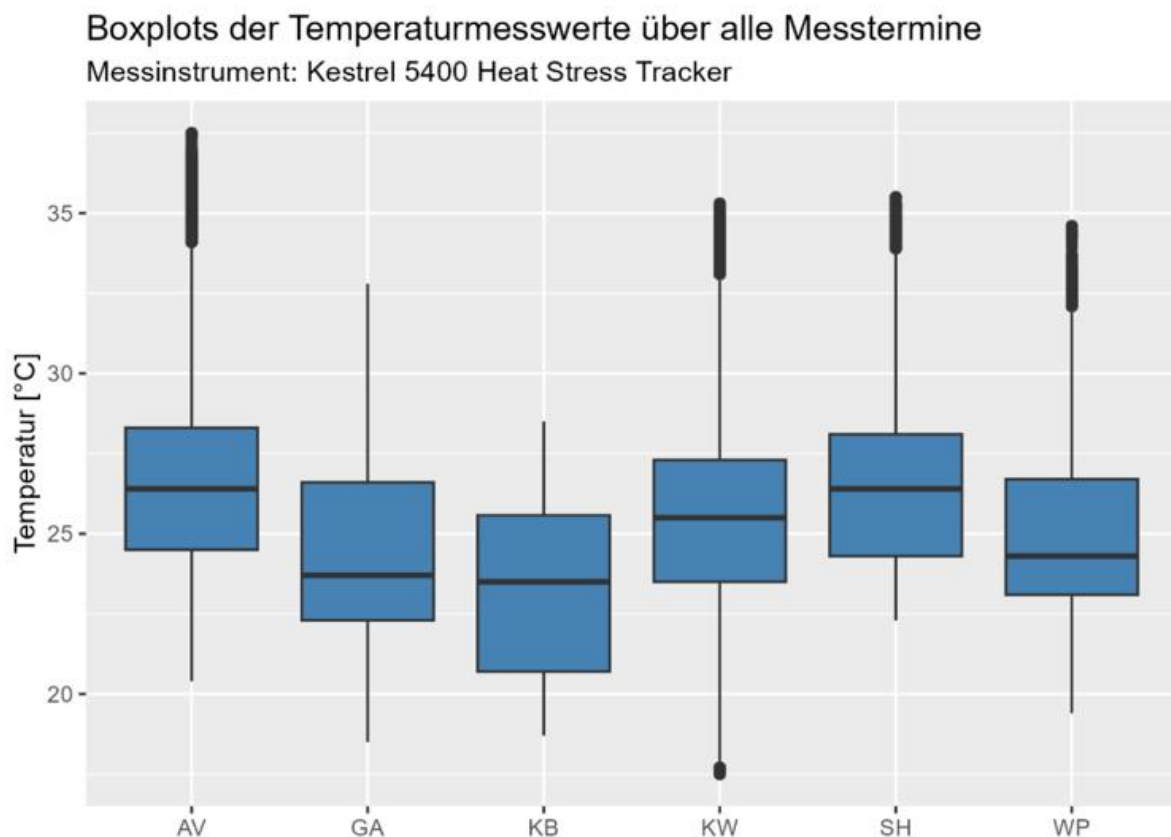


Abb. 1: Boxplots der Temperaturmesswerte in verschiedenen Untersuchungsgebieten über alle Messtermine. Die Temperaturwerte wurden mit Kestrel 5400 Heat Stress Trackern mit einer zeitlichen Auflösung von zwei Sekunden entlang vordefinierter Routen in den Untersuchungsgebieten zeitgleich erfasst. Alle Unterschiede der Mittelwerte (bis auf AV und SH) sind statistisch signifikant gemäß ANOVA und nachfolgendem Tukey Test. AV = Antonsviertel, GA = Galgenablass (Mischwald), KB = Kinderwagenbogen (buchendominierter Mischwald), KW = Kiefernwald, SH = Schießplatzheide, WP = Wittelsbacher Park.

Für die mobilen Klimamessungen erfolgte in einem weiteren analytischen Schritt mittels Hauptkomponentenanalyse eine Dimensionsreduktion der erfassten Messgrößen. Eine hierarchische Clusteranalyse der Hauptkomponentenwerte diente zur Auffindung der Startpartitionen für nachfolgende k-means Clusteranalysen. Auf diesen Grundlagen wurden alle Routen, sowohl gebietsspezifisch als auch gebietsübergreifend, also unter Berücksichtigung aller Messwerte, in mikroklimatisch charakteristische Abschnitte eingeteilt. Abbildung 2 zeigt dies beispielhaft für die Mischwald-Route am Galgenablass für fünf verschiedene lokalklimatische Cluster. Interessant hierbei ist, dass sich Veränderungen in der Waldstruktur bzw. der Umgebungsvariablen entlang der Route gut mit den sich ergebenden Clustern decken. So scheint Cluster Nr. 2 durch den Einfluss von Wasserflächen geprägt zu sein, während Cluster Nr. 3 und 4 durch verschieden dichte Waldbestände führen, Cluster Nr. 5 führt durch einen buchendominierten Teil der Route und schließlich bildet Cluster Nr. 1 das Ende des Waldes und den Übergang zur offenen Wiesenfläche ab (Abb. 2).

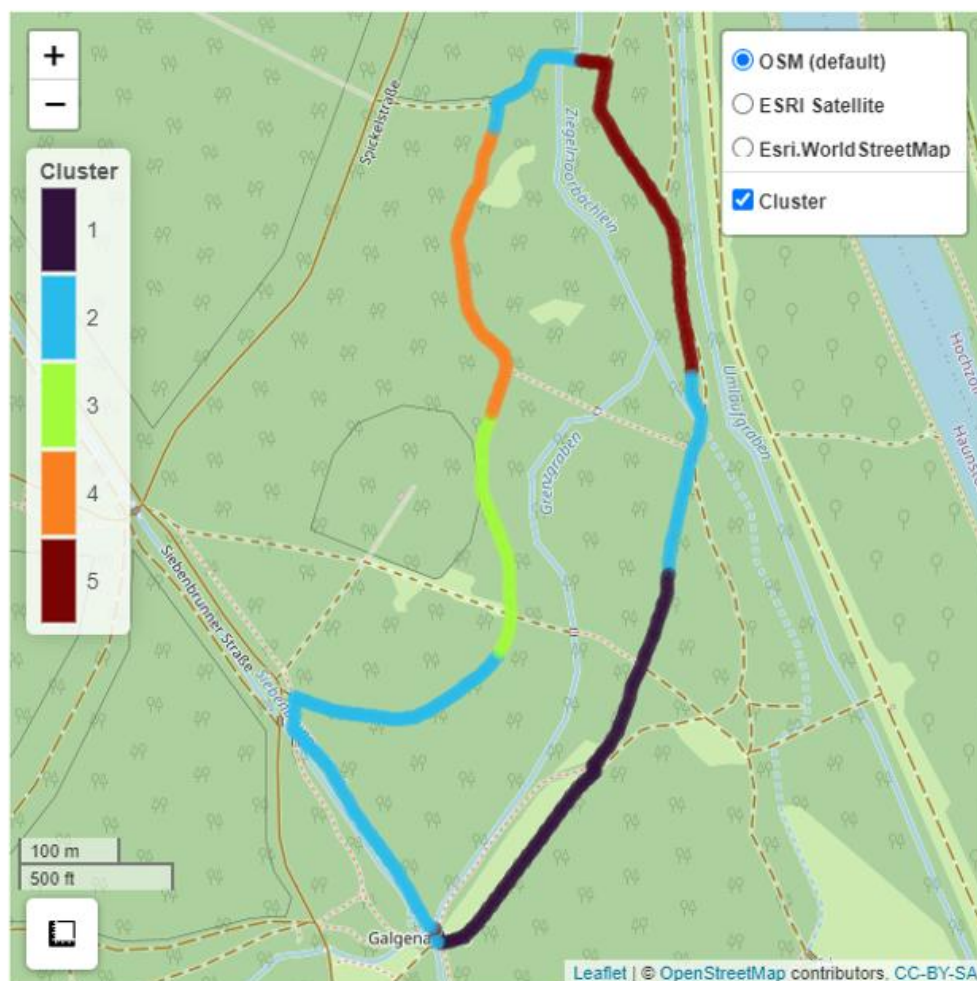


Abb. 2: Lokalklimatisch differenzierte Routenabschnitte im Untersuchungsgebiet Galgenablass. Basierend auf einer nicht-hierarchischen Clusteranalyse (k-means mit Startpartition aus hierarchischer Clusteranalyse) rotierter Hauptkomponentenwerte einer Hauptkomponentenanalyse mobiler Klimamessgrößen.

In einem weiteren Schritt sollen auch die objektiven Gesundheitsdaten sowie die subjektiven Einschätzungen der Probandinnen und Probanden zu ihrem persönlichen Wohlbefinden in die Analysen miteinbezogen werden. Außerdem sollen die messtechnisch erfassten Klimavariablen mit den Ergebnissen der Mikroklimasimulationen verglichen werden. Interessant ist in diesem Kontext auch die angestrebte Wiederholung des gesamten Studiensettings in verschiedenen Jahreszeiten, um die objektiven und subjektiven Klima- und Gesundheitseffekte urbaner Waldstrukturen auch über den Kontext der thermischen Hitzebelastung hinaus zu erfassen und zu modellieren.

### Literatur:

- BRUSE, M., 2018: ENVI\_MET a holistic microclimate model. <http://www.envi-met.info>
- DEMUZERE, M., ORRŪ, K., HEIDRICH, O., OLAZABAL, E., GENELETTI, D., ORRU, H., BHAVE, A.G., MITTAL, N., FELIU, E., FAEHNLE, M., 2014: Mitigating and adapting to climate change: Multi-functional and multi-scale assessment of green urban infrastructure. *Journal of environmental management* **146**, 107-115.
- DZYUBAN, Y., HONDULA, D. M., VANOS, J. K., MIDDEL, A., COSEO, P. J., KURAS, E. R., REDMAN, C. L., 2022: Evidence of alliesthesia during a neighborhood thermal walk in a hot and dry city. *Science of the Total Environment* **834**, 155294.
- FANGER, P. O., 1970: Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering.
- GILLEROT, L., ROZARIO, K., DE FRENNE, P., OH, R., PONETTE, Q., BONN, A., CHOW, W., GOD-BOLD, D., STEINPARZER, M., HALUZA, D., LANDUYT, D., MUYS, B., VERHEYEN, K., 2024: Forests are chill: The interplay between thermal comfort and mental wellbeing. *Landscape and Urban Planning* **242**, 104933.
- GRAMMATIKOPOULOU, I., VAČKÁŘOVÁ, D., 2021: The value of forest ecosystem services: A meta-analysis at the European scale and application to national ecosystem accounting. *Ecosystem Services*. **48**, 101262.
- KARIM, A. A., KHALIL, R., SCHMITT, M., 2020: Wald reloaded – Die Neuentdeckung des Waldes aus gesundheitspsychologischer Sicht. *Zeitschrift für Komplementärmedizin* **12(02)**, 24-30.
- LIU, Q., WANG, X., LIU, J., AN, C., LIU, Y., FAN, X., HU, Y., 2021: Physiological and psychological effects of nature experiences in different forests on young people. *Forests* **12(10)**, 1391.
- LIVESLEY, S. J., MCPHERSON, E. G., CALFAPIETRA, C., 2016: The urban forest and ecosystem services: Impacts on urban water, heat, and pollution cycles at the tree, street, and city scale. *Journal of environmental quality* **45(1)**, 119-124.
- VANOS, J. K., WARLAND, J. S., GILLESPIE, T. J., KENNY, N. A., 2010: Review of the physiology of human thermal comfort while exercising in urban landscapes and implications for bioclimatic design. *International journal of biometeorology* **54**, 319-334.

**Schlüsselwörter:** Thermal Walks, Ecosystem Services, Forest Structures, Nature Experience, Climate Effects, Physiological Effects, ENVI-met

## Mikroskalige Modellierung der erythemwirksamen UV-Bestrahlungsstärke in städtischen Umgebungen unter Verwendung des gebäudeauflösenden Stadtklimamodells PALM-4U

*Matthias Sühling<sup>1,2</sup>, Katrin F. Gehrke<sup>1</sup>, Helge Knoop<sup>1</sup>, Cornelia Baldermann<sup>3</sup>, Sebastian Lorenz<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>pecanode GmbH (Deutschland)

<sup>2</sup>Leibniz Universität Hannover (Deutschland)

<sup>3</sup>Bundesamt für Strahlenschutz (Deutschland)

Die starke Exposition des Menschen gegenüber ultravioletter (UV) Sonnenstrahlung hat vielfältige kurz- und langfristige Auswirkungen. Um die Bevölkerung über die aktuelle UV-Belastung zu informieren, werden in der Regel Vorhersagen über den UV-Index veröffentlicht. Der UV-Index bezieht sich jedoch auf eine flache Oberfläche ohne Hindernisse und spiegelt daher nicht vollständig die Situation in bebauten Umgebungen, wo die UV-Bestrahlungsstärke räumlich sehr heterogen sein kann. Zum Beispiel sind in städtischen Umgebungen Teile des Himmels durch Gebäude oder Bäume verdeckt. Aufgrund des relativ großen Anteils an diffuser Strahlung im UV-Spektrum können selbst weit entfernte Hindernisse zu einer erheblichen Verringerung der UV-Bestrahlungsstärke im Vergleich zu einer nicht verdeckten Umgebung führen. Im Gegensatz dazu können Reflexionen an Glasflächen oder UV-reflektierenden Fassadenmaterialien lokal die UV-Bestrahlungsstärke erhöhen.

Um Stadtplaner in die Lage zu versetzen, potenzielle Bereiche mit erhöhter UV-Bestrahlung zu ermitteln und geeignete Strategien zu deren Reduktion zu entwickeln, z.B. durch zusätzlichen Sonnenschutz, wird ein urbanes UV-Modul in das mikroskalige Stadtklimamodell PALM-4U implementiert. Das UV-Modul modelliert spektral aufgelöste und richtungsabhängige Abschattungs- und Reflexionsmuster durch Gebäude und Bäume auf der Grundlage eines Sky-View Faktor Ansatzes, während die einfallende UV-Bestrahlungsstärke / Strahldichte am Oberrand der städtischen Schicht durch ein gekoppeltes externes atmosphärisches Strahlungsmodell bereitgestellt wird. Mit diesem Modellierungsansatz können 2D-Karten der erythemwirksamen Bestrahlungsstärke für spezifische UV-Szenarien erstellt werden.

Zur Demonstration der Fähigkeiten des urbanen UV-Modells, zeigen wir Ergebnisse für realistische städtische Umgebungen unter verschiedenen physikalischen Bedingungen. Ebenso wird der Einfluss von Mehrfachreflexionen an Gebäudefassaden auf die erythemwirksame Bestrahlungsstärke betrachtet.

## CoSynHealth – Entwicklung von Klimadienstleistungen für die zukünftige StadtGesundheit auf der Grundlage eines Stadtsystemansatzes

*Peter Hoffmann<sup>1</sup>, Sabine Fritz<sup>1</sup>, Dante T. Castro Garro<sup>1</sup>, Deniz Sirin<sup>1</sup>, Jürgen Scheffran<sup>2</sup>, Jobst Augustin<sup>3</sup>, Sari Kovatz<sup>4</sup>, James Milner<sup>4</sup>, Keishiro Hara<sup>5</sup>, Yutaka Nomaguchi<sup>6</sup>, Jana Sillmann<sup>7</sup>*

<sup>1</sup>Climate Service Center Germany (GERICS), Helmholtz-Zentrum Hereon, Hamburg (Deutschland)

<sup>2</sup>Research Group Climate Change and Security, Institute of Geography, University of Hamburg, Hamburg (Deutschland)

<sup>3</sup>Institute for Health Services Research in Dermatology and Nursing (IVDP), University Medical Center Hamburg-Eppendorf (UKE), Hamburg (Deutschland)

<sup>4</sup>Centre on Climate Change and Planetary Health, London School of Hygiene & Tropical Medicine, London (Großbritannien)

<sup>5</sup>Center for Future Innovation (CFi), Graduate School of Engineering, Osaka University, Osaka, (Japan)

<sup>6</sup>Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering, Osaka University, Osaka (Japan)

<sup>7</sup>Center for Earth System Research and Sustainability (CEN), University of Hamburg, Hamburg (Deutschland)

Der Gesundheitsaspekt wird in Szenarien für CO<sub>2</sub>-neutrale Städte meist übersehen, da sie sich hauptsächlich auf Maßnahmen zur Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen konzentrieren, um den Klimawandel abzuschwächen. Stadtplanung und Änderungen der Lebensweise, wie z.B. Veränderungen der Stadtstruktur zur Förderung neuer Mobilitätsmuster oder die Förderung von Verhaltensänderungen der Bevölkerung, können sich jedoch auf die Gesundheit auswirken, indem sie die Exposition gegenüber Umweltstressoren wie Hitzestress verändern. Gleichzeitig entwickeln Gesundheitsexperten und Städteplaner Klimaanpassungsmaßnahmen, um Gesundheitsrisiken zu verringern, und schlagen Lebensstile vor, die die Gesundheit der Stadtbewohner in Zukunft verbessern sollen. Für eine nachhaltige Entwicklung der Städte ist jedoch eine Kombination aus Klimaschutz und Klimaanpassung erforderlich, da sich das globale Klima unabhängig von den weltweiten Bemühungen zur Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in den nächsten Jahrzehnten weiter verändern wird.

Das CoSynHealth-Projekt schließt die Lücken zwischen der Klimaschutzforschung einerseits und der Klimaanpassungsforschung andererseits, indem es einen integrativen Stadtsystemansatz verwendet, der die komplexen Wechselwirkungen zwischen der städtischen Umwelt, der städtischen Morphologie, der Stadtgesellschaft, den Stadtbewohnern und der StadtGesundheit berücksichtigt. Auf der Grundlage dieses Ansatzes werden neue Klimadienstleistungen gemeinsam mit den relevanten Stakeholdern entwickelt, um den Bedarf an klima- und gesundheitsbezogenen Informationen während des Szenarienentwicklungsprozesses zu decken. Insbesondere werden regionale Klimaprojektionen, hochauflösende Stadtklimasimulationen und agentenbasierte Modelle integriert, um die künftige Belastung durch Hitzestress zu ermitteln und anschließend die Auswirkungen von Klimaschutz- und Klimaanpassungsmaßnahmen auf die potenziellen Gesundheitsfolgen auf Stadtebene zu bewerten. Ziel ist es, Synergien der Maßnahmen zu identifizieren und mögliche Konflikte zu vermeiden.

In der Präsentation werden die verwendeten Konzepte und Methoden vorgestellt sowie erste Ergebnisse der einzelnen Arbeitsschritte präsentiert und diskutiert.

## 1.2 Poster

### Identifikation kleinräumiger lokaler Klimate in einem Crowdsourcing-Netzwerk

*Aboubakr El Hacen Benabbas<sup>1</sup>, Leonie Ackermann<sup>1</sup>, Reem Eslam Mohamed Mekky Kkhalil<sup>1</sup>, Daniela Nicklas<sup>1</sup>, Thomas Foken<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Universität Bamberg, Lehrstuhl für Informatik, insbesondere Mobile Softwaresysteme/Mobilität (Deutschland)

<sup>2</sup>Universität Bayreuth, Bayreuther Zentrum für Ökologie und Umweltforschung (BayCEER) (Deutschland)

Zunehmend entstehen in Städten Crowdsourcing Netzwerke, um lokale Klimazonen besser lokalklimatisch zu charakterisieren und beispielsweise diese Daten in Hitzeschutzpläne einzubeziehen. Charakteristisch für das Crowdsourcing ist, dass aus der massenhaften Verfügbarkeit von Daten und einem entsprechenden Qualitätsmanagement zuverlässige Aussagen getroffen werden können. Dabei werden üblicherweise Daten eliminiert, die z.B. am Tag immer zu kühl oder in der Nacht immer zu warm o. ä. sind. Bei einem Crowdsourcing-Netzwerk für die historische Altstadt von Bamberg hat sich gezeigt, dass beispielsweise begrünte Innenhöfe am Tag deutlich kühler sind oder Gebäude nahe der Regnitz tagsüber kühler und in der Nacht erheblich wärmer sind und somit ein Lokalklima aufweisen, welches beispielsweise für lokale „kühle Zonen“ wichtig ist. In einem ersten Schritt werden Messstationen, die typische Abweichungen gegenüber der Umgebung haben mit einem Flag gekennzeichnet. Die Definition für die einzelnen Flags ergibt sich aus der Definition von Besonderheiten lokaler Klimazonen unter Hinzuziehung von Besonderheiten des kurz- und langwelligen Strahlungsregimes und evtl. stärkerer Verdunstungen. Zu diesem Zweck wurde die Auswertesoftware CrowdQC+ für das Crowdsourcing entsprechend ergänzt. Perspektivisch sollen derartige Muster durch künstliche Intelligenz automatisch erkannt werden. Die Arbeiten werden im Rahmen von Masterarbeiten an der Universität Bamberg und dem Smart-City Projekt der Stadt Bamberg durchgeführt.

## Quantifizierung der Wirksamkeit von Anpassungsmaßnahmen an Hitze im Freiraum – eine Implementierung im HRC-Hitzetool

Uta Moderow, Valeri Goldberg, Astrid Ziemann

Prof. für Meteorologie, Technische Universität Dresden, Dresden (Deutschland)

Im Rahmen des Projekts HeatResilientCity wurden Indikatoren entwickelt, die die Entscheidungsfindung bei der Auswahl von Anpassungsmaßnahmen (AM) an Hitze in der Stadt unterstützen (Freiraum und Gebäude). Diese Indikatoren sind in dem HRC-Hitzetool (<https://hrc-hitzetool.ioer.info/>) implementiert. Der geplante Beitrag stellt den Indikator für den Freiraum vor.

Die gemeinsame Entwicklung mit Praxispartnern aus den Städten Erfurt und Dresden erlaubt sowohl eine erste, niederschwellige Quantifizierung der Wirksamkeit von Anpassungsmaßnahmen als auch eine Reihung von verschiedenen Maßnahmen. Mit diesen Eigenschaften trägt der entwickelte Indikator dazu bei, den verantwortlichen Akteuren in den Kommunen und Städten nützliche und nutzbare Werkzeuge für die Entscheidungsfindung bezüglich passender AM bereitzustellen. Dabei liegt der Fokus auf dem Einsatz von urbanem Grün. Die qualitative Aussage „Grün ist gut“ kann mit quantitativen Angaben gestützt werden.

Der Indikator selbst basiert auf Stadtklimasimulationen für zwei reale Quartiere mit dem Modell ENVI-met (Bruse, 1999). Diesen Simulationen sind ausgewählte Teilflächen entnommen worden, die beispielhaft für bestimmte Anpassungsmaßnahmen oder auch Ausgangssituationen stehen können. Dabei wird auf kleinräumige Maßnahmen sowie Straßenbegleitgrün und deren lokalen Auswirkungen fokussiert. Es ist möglich, sowohl die Auswirkungen in der Nacht als auch am Tag zu beurteilen (tageszeitliche Differenzierung). Die Bewertung der Maßnahmen erfolgt auf Basis des Universellen Thermischen Klimaindexes (UTCI, Jendritzky et al., 2012) und adressiert somit die menschliche Hitzebelastung. Insbesondere diese Eigenschaft hebt den Indikator von anderen Indikatoren ab, die zumeist die Lufttemperatur adressieren und nicht die komplexere, menschliche Hitzebelastung (Brzoska et al., 2022). Möchte ein Nutzer nun die Wirkung einer AM beurteilen, kann er aus den bereitgestellten Flächen diejenigen Flächen auswählen, die am besten den Zuständen ohne AM und mit der gewünschten AM entsprechen. Aus dem Vergleich beider gewählten Flächen lassen sich Aussagen zur Wirksamkeit der AM ableiten. Neben der quantitativen Aussage zur Wirksamkeit werden die Ergebnisse mittels Ampelsystem verdeutlicht sowie mit einem kurzen Text und gegebenenfalls Hinweisen auf weitere relevante Aspekte ergänzt. Die Möglichkeit zur Flächenauswahl erlaubt es ebenfalls nachteilige Effekte von z.B. Versiegelung oder Reduzierung von Stadtgrün zu beurteilen und aufzuzeigen.

### Literatur:

- BRUSE, M., 1999: Die Auswirkungen kleinskaliger Umweltgestaltung auf das Mikroklima. Entwicklung des prognostischen numerischen Modells ENVI-Met zur Simulation der Wind-, Temperatur- und Feuchteverteilung in städtischen Strukturen, Universität Bochum, Bochum, <https://doi.org/10.23689/fidgeo-440>.
- BRZOSKA, P., FÜGENER, T., MODEROW, U., ZIEMANN, A., SCHÜNEMANN, C., WESTERMANN, J., GRUNEWALD, K., MAUL, L., 2022: Towards a web tool for assessing the impact of climate change adaptation measures on heat stress at urban site level, *One Ecosystem*, 7, e85559, <https://doi.org/10.3897/oneeco.7.e85559>.
- JENDRITZKY, G., DEAR, R. de, HAVENITH, G., 2012: UTCI—Why another thermal index? *Int J Biometeorol*, 56, 421–428, <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0513-7>, 2012.

**Schlüsselwörter:** Stadt, Anpassungsmaßnahmen, Klimawandel, menschliche Hitzebelastung

## **Vegetation-water-interactions in the urban area of Hamburg – A spatially explicit remote sensing assessment**

*Nadine Kaul<sup>1,2</sup>, Nikola Lenzewski<sup>2</sup>, Kai Jensen<sup>2</sup>, Jürgen Böhner<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Institute of Geography, Physical Geography, Center for Earth System Research and Sustainability (CEN), Universität Hamburg (Deutschland)

<sup>2</sup>Institute of Plant Science and Microbiology, Applied Plant Ecology, Universität Hamburg (Deutschland)

Plants in urban areas are exposed to a broad range of environmental stressors that are exacerbated by climate change. At the same time, they fulfill many important functions, making them indispensable to the urban climate and thus to the urban population.

The effect of climate change on urban plants can be two-fold: While an increase in heat waves and droughts enhances drought stress, changes towards “too much water” in the form of storm surges, river flooding, heavy rainfall events and rising groundwater levels can be challenging as well. For efficient adaptation planning, spatially explicit knowledge about the interactions of these changes and their effect on vegetation condition is needed. In addition, vegetation properties can be used as indicators to identify water-related changes when measurement data are limited.

To investigate changes in vegetation condition for the urban area of Hamburg, time series of vegetation indices based on Sentinel-2 satellite imagery are analysed. Greening and browning trends over the 8-year observation period of Sentinel-2 are calculated on a cell-wise basis to capture small-scale spatial patterns. Potential driving factors for intra-seasonal variations in the index patterns are derived from automatic weather stations and soil measurements of the HUSCO network and the Hamburg Weather-Mast. Statistical and numerical models are used to relate these driving factors to the vegetation condition indices.

The results of the analysis help to (1) identify areas of concern for the development of targeted adaptation measures and (2) to better understand small-scale water changes in the urban area of Hamburg.

## 2 Landwirtschaft im Klimawandel

### 2.1 Vorträge

#### Application of climate change scenarios on selected pest algorithms in Austria

*Sabina Thaler<sup>1</sup>, Kerstin Kolkmann<sup>2</sup>, Sylvia Blümel<sup>2</sup>, Josef Eitzinger<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Institute of Meteorology and Climatology, Department of Water, Atmosphere and Environment, University of Natural Resources and Life Sciences Vienna (Austria).

<sup>2</sup>Institute for Sustainable Plant Production, Department for Plant Health in fruit crops, viticulture & special crop, Austrian Agency for Health and Food Safety (AGES), Vienna (Austria)

The population dynamics and spread of thermophilic pest insects will change with global warming and will potentially increase the risk for plant production and crop damage (Skendžić et al., 2021).

Long-term monitoring of insect pests can provide appropriate data for projecting future risk trends in the context of a changing climate through the use of pest models (Blümel et al., 2020; Bradshaw et al., 2016; Gutierrez and Ponti, 2014; Lastuvka, 2009; Maggiore et al., 2020; Paini et al., 2016). In Austria corresponding databases from monitoring programs for a variety of insect pests in major crops are available for integrated pest management, along with seasonal forecasts (lkonline, 2023). Based on these specific pest models tested in Austrian case study regions, the ACRP-project RIMPEST (“The effect of changing climate on potential risks from important insect pests on plant production in Austria and related adaptation options”) simulates and analyzes pest trends under crop land-use and climate scenarios.

For the European grapevine/-berry moths (*Lobesia botrana* and *Eupoecilia ambiguella*), American grapevine leafhopper (*Scaphoideus titanus*) and plum fruit moth (*Grapholita funebrana*) monitoring data from selected site clusters (Fig. 1) and related weather data from reference weather stations were used to calibrate and validate the different models. Multiple linear regression models were developed to predict the 1<sup>st</sup> emergence of adult grapevine/-berry moths and plum fruit moth as well as the first hatching of the 1<sup>st</sup> nymphal stage of American grapevine leafhopper.

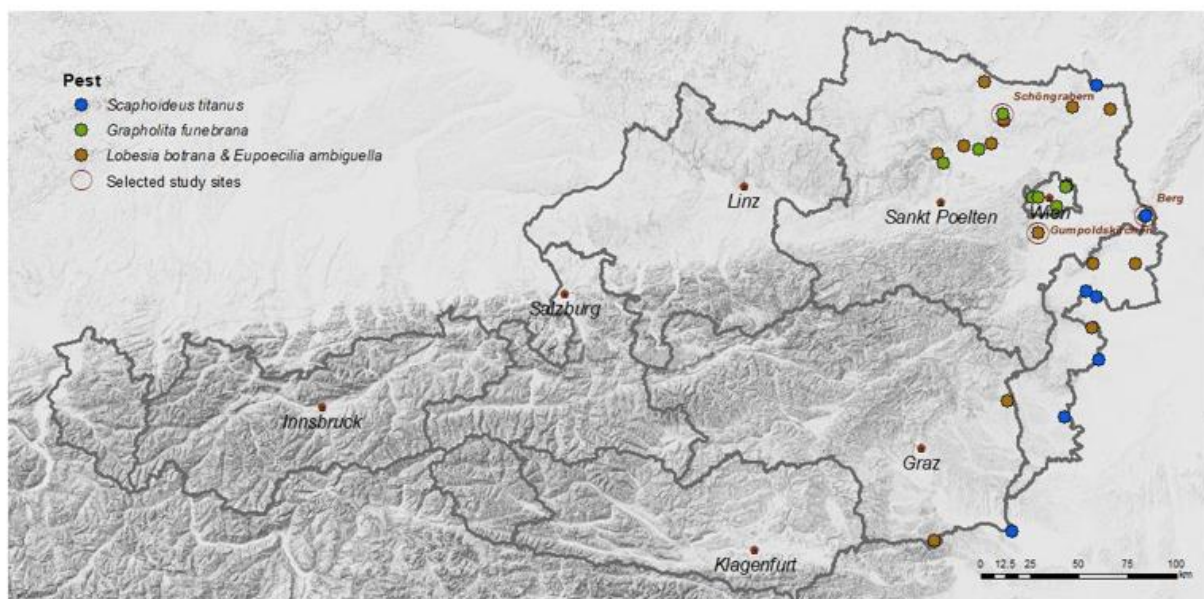


Fig. 1: Monitoring sites and selected simulation study sites for the insect pests European grapevine/-berry moths (*Lobesia botrana* and *Eupoecilia ambiguella*), American grapevine leafhopper (*Scaphoideus titanus*) and plum fruit moth (*Grapholita funebrana*) in Austria.

Five different Austrian climate projections (ÖKS15) (Chimani et al., 2016) based on daily meteorological data for two emission scenarios, RCP 4.5 as well as RCP 8.5, and two time periods (2021-2050; 2071-2100) were used to estimate the range of future potential pest risks in the different Austrian growing regions. The period 2003-2022 was used as our reference period, as daily grid data with a resolution of 1x1 km is available for Austria (INCA data) (Haiden et al., 2010). For the present study, the three locations Berg, Gumpoldskirchen and Schönggrabern were analyzed more in detail (Fig. 1). As the bias correction of the ÖKS15 data included the period 1971-2000, the weather data of our reference period (2003-2022) deviates between INCA-data (observed data) and ÖKS15 projections (Fig. 2).

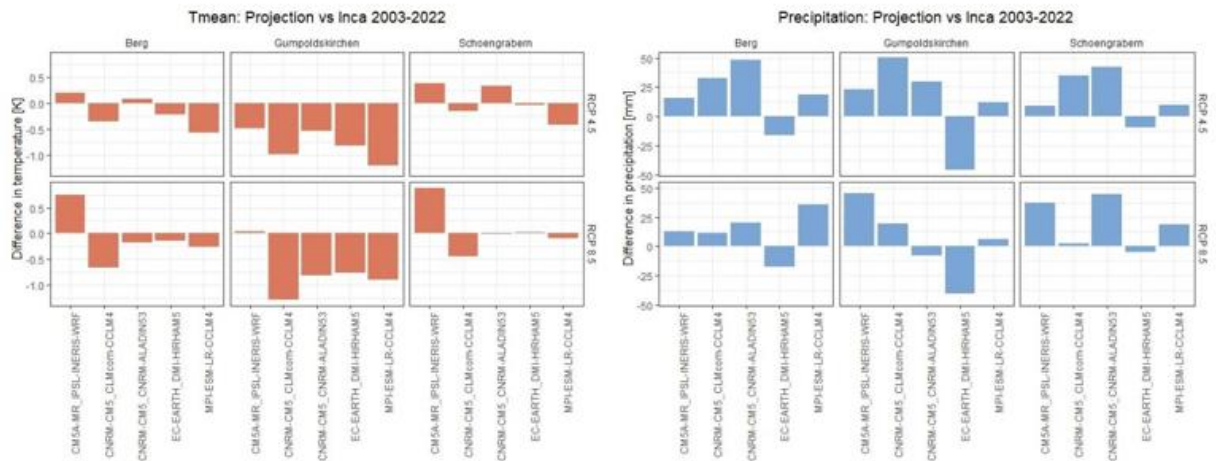


Fig. 2: Temperature and precipitation differences between the various ÖKS15 projections and the INCA data (observed data) for the period 2003-2022 for the three locations Berg, Gumpoldskirchen and Schönggrabern.

While the annual mean temperatures in the various ÖKS15 projections are lower compared to the INCA data, with the exception of CM5A-MR\_IPSL-INERIS-WRF, the annual precipitation sums are mostly higher (exception: EC-EARTH\_DMI-HIRHAM5). Due to these deviations, the comparisons between the two future periods and the reference period were carried out within the individual ÖKS15 projections (Fig. 3).

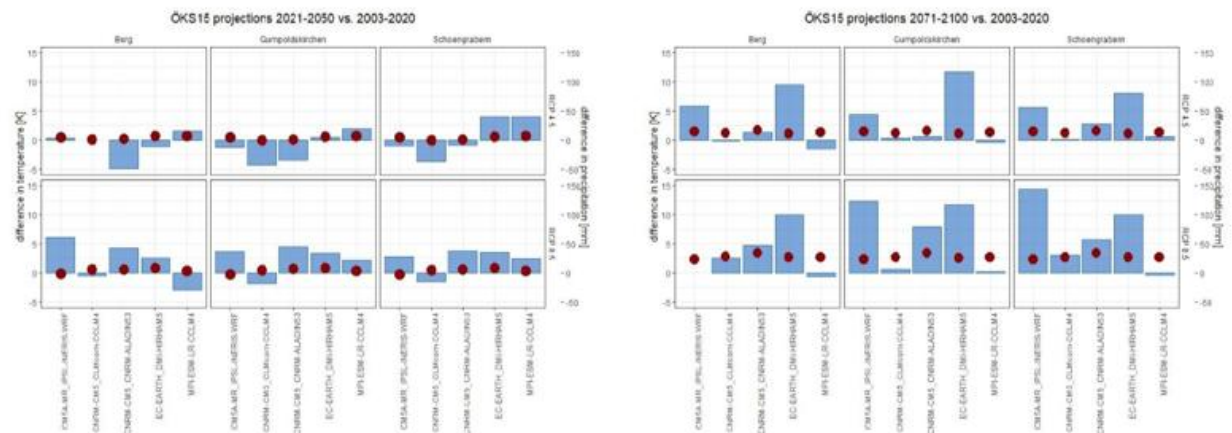


Fig. 3: Differences in yearly mean temperature (red dots) in K and annual precipitation sum (blue bars) in mm between 2021-2050 vs 2003-2022 and 2071-2100 vs 2003-2022 within the selected ÖKS15 projections for the three locations Berg, Gumpoldskirchen and Schönggrabern.

A comparison of the 2021-2050 period with the reference period reveals slight differences in the annual temperatures. The average change in ensemble means is +0.2K in Berg, -0.4K in Gumpoldskirchen and +0.4K in Schöngrabern for RCP 4.5; in RCP 8.5, a temperature increases of 0.7K can be observed in all three locations. The annual precipitation totals are characterised by larger fluctuations. In RCP4.5, precipitation is in near future lower for the most part, particularly in CNRM-CM5\_CNRM-ALADIN53. The situation is different in RCP8.5 with an ensemble mean between +22mm in Gumpoldskirchen, +44mm in Schöngrabern and +50mm in Berg with much higher precipitation sums.

Climate change will become more visible by the end of the century (2071-2100). For example, temperatures will increase by around 1K in RCP 4.5 and by 2K in RCP 8.5 in the three study sites. A marked increase in precipitation is also recognisable for RCP 4.5 with around 50 mm on average in all three locations. In RCP 8.5 the ensemble mean is in Berg +58mm, in Gumpoldskirchen +17mm and in Schöngrabern +50mm. The variability between the individual projections is much more pronounced here.

Site specific application of the validated pest algorithms show shifts of variable size in pest phenology, depending on the climatological region and the mentioned future time periods. The first occurrence of 1<sup>st</sup> generation adults of *L. botrana* and *E. ambiguella*, the 1<sup>st</sup> nymphal stage of *S. titanus* and the 1<sup>st</sup> generation adults of *G. funebrana* show different degrees of response under climate warming towards earlier first occurrence dates (- x days) (Fig. 4) and that goes partly in parallel with shifted growing areas of the host plants. While the shifts towards earlier first occurrence dates are still small (0 to -2 days), in the period 2021-2050, they increase to more than seven days earlier than today by the end of the century.

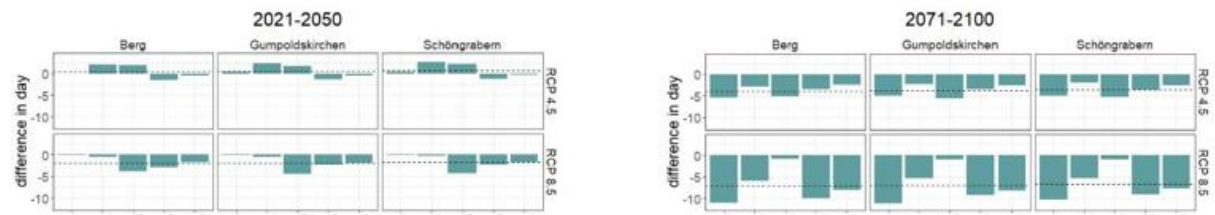
While the first day of occurrence of *L. botrana* is expected to be shifted forward by an average of approx. 0.5 days (RCP 4.5) respectively 2 days (RCP 8.5) in the period 2021-2050, 4 days in RCP 4.5 and 7 days in RCP 8.5 are predicted for the end of the century at all three locations. This is not so noticeable with *E. ambiguella*. Here, the ensemble mean shows 0 to 0.5 days earlier in RCP 4.5 and 1 to 1.5 days earlier in RCP 8.5 in the period 2021-2050; at the end of the century, it shifts from -4 days (RCP 4.5) to -6 days (RCP 8.5). The described changes in the first occurrences of the European grapevine/-berry moths show the same trend at all three study sites.

For the plum fruit moth similar results were obtained. The first occurrence is expected between 0.5 days (RCP 4.5) and 1 day (RCP 8.5) earlier in the 2021-2050 period, however at around 4 days (RCP 4.5) and between 6 days (Berg) and 7 days (Gumpoldskirchen) in RCP 8.5 in the end of the century.

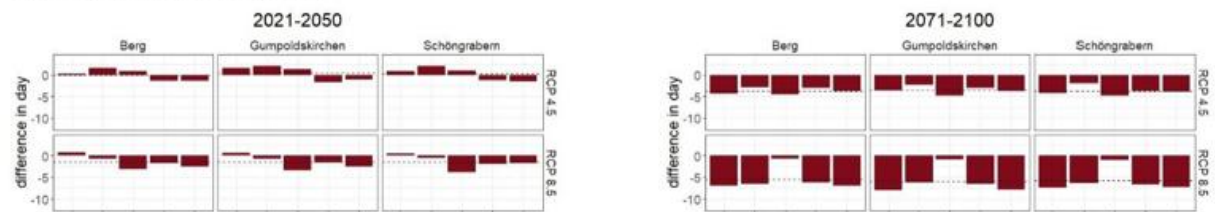
The first hatching of nymphal stage 1 of *S. titanus* will occur 1 day (RCP 4.5) respectively 2 days earlier (RCP 8.5) in the ensemble mean in the period 2021-2050, whereas Schöngrabern the smallest shifts shows here. 2071-2100 there is a clear shift of at least -5 days in RCP4.5 and -6 to -7.2 days in RCP8.5 in mean.

The results of the project should inform and support practice and policy for designing future strategies for optimized crop and pest management options.

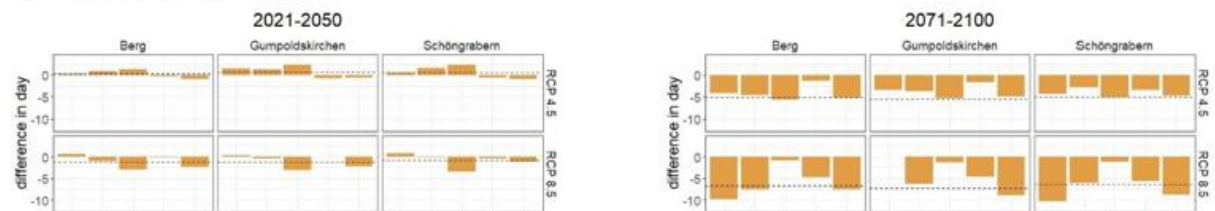
(a) *Lobesia botrana*



(b) *Eupoecilia ambiguella*



(c) *Grapholita funebrana*



(d) *Scaphoideus titanus*

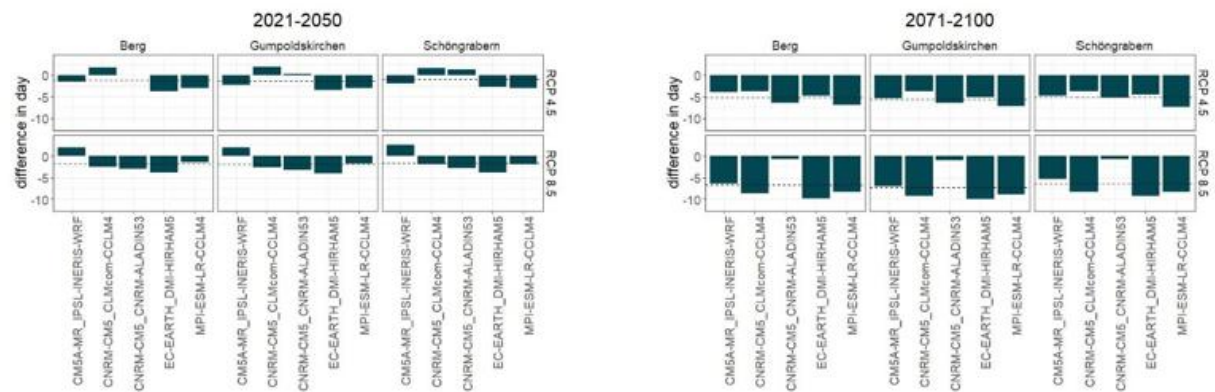


Fig. 4: Deviations in the first day of occurrence of (a) *Lobesia botrana*, (b) *Eupoecilia ambiguella* and (c) *Grapholita funebrana* as well as in the first hatching of the nymphal stage 1 of (d) *Scaphoideus titanus* in Berg, Gumpoldskirchen and Schönggrabern between 2021-2050 vs 2003-2022 and 2075-2100 vs 2003-2022: ensemble mean (black dashed lines) and selected ÖKS15 projections differences (bars).

**References:**

BLÜMEL, S., EITZINGER, J., GRUBER, B., GATTERER, M., ALTENBURGER, J., HAUSDORF, H., 2020. Influence of weather variables on the first seasonal occurrence of the grape berry moths *Eupoecilia Ambiguella* (Lepdoptera: Tortricidae) and *Lobesia Botrana* (Lepidoptera: Tortricidae) in a case study region in Austria. *Mitteilungen Klosterneuburg* **70**, 115-128.

BRADSHAW, C.J.A., LEROY, B., BELLARD, C., ROIZ, D., ALBERT, C., FOURNIER, A., BARBET-MASSIN, M., SALLES, J.-M., SIMARD, F., COURCHAMP, F., 2016. Massive yet grossly underestimated global costs of invasive insects. *Nat Commun* **7**, 12986.

- CHIMANI, B., HEINRICH, G., HOFSTÄTTER, M., KERSCHBAUMER, M., KIENBERGER, S., LEUPRECHT, A., LEXER, A., PEßENTEINER, S., POETSCH, M.S., SALZMANN, M., SPIEKERMANN, R., SWITANEK, M., TRUHETZ, H., 2016. ÖKS15 – Klimaszenarien für Österreich. Daten, Methoden und Klimaanalyse. Wien, Österreich. [online] URL: [https://www.bmk.gv.at/themen/klima\\_umwelt/klimaschutz/anpassungsstrategie/publikationen/oeks15.html](https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/klimaschutz/anpassungsstrategie/publikationen/oeks15.html). Accessed: 6 Dec. 2023.
- GUTIERREZ, A., PONTI, L., 2014. Analysis of invasive insects: links to climate change. CABI.
- Haiden, T., KANN, A., PISTOTNIK, G., STADLBACHER, K., WITTMANN, C., 2010. Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis (INCA) System description. Central Institute for Meteorology and Geodynamics, Vienna, Austria.
- LASTUVKA, Z., 2009. Climate change and its possible influence on the occurrence and importance of insect pests. *Plant Protection Science* **45**, S53-S62.
- LKONLINE, 2023. Pflanzenschutz-Warndienst. [online] URL: <https://warndienst.lko.at/>. Accessed: 6 Dec. 2023.
- MAGGIORE, A., AFONSO, A., BARRUCCI, F., SANCTIS, G.D., 2020. Climate change as a driver of emerging risks for food and feed safety, plant, animal health and nutritional quality. *EFSA Supporting Publications* **17**, 1881E.
- PAINI, D.R., SHEPPARD, A.W., COOK, D.C., DE BARRO, P.J., WORNER, S.P., THOMAS, M.B., 2016. Global threat to agriculture from invasive species. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **113**, 7575-7579.
- SKENDŽIĆ, S., ZOVKO, M., ŽIVKOVIĆ, I.P., LEŠIĆ, V., LEMIĆ, D., 2021. The Impact of Climate Change on Agricultural Insect Pests. *Insects* **12**, 440.

**Keywords:** European grapevine/-berry moths, American grapevine leafhopper, plum fruit moth, regression-based model, ÖKS15 projections, global warming, agriculture, viticulture

## How to grow spring barley under warmer climate conditions in Germany?

Ali Yigit<sup>1,2</sup>, Frank-M. Chmielewski<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Humboldt-University of Berlin, Faculty of Life Sciences, Institute of Agricultural and Horticultural Sciences, Professorship of Agricultural Climatology, Berlin-Dahlem (Germany)

<sup>2</sup>Aydın Adnan Menderes University, Faculty of Agriculture, Department of Field Crops, Aydın (Türkiye)

### Introduction

Negative impacts of climate change on crop productivity is one of the most important issues highlighted by researchers in recent years. This can affect local and regional food security around the world. Assessing crop performance and yield stability is important to ensure the sustainability of agricultural production for the future. This requires data from long-term and mid-term experiments that provide detailed information on the relationships between weather and yield variability (Macholdt et al., 2020). World production of barley (*Hordeum vulgare* L.) is dominated by European countries, followed by Asia and South America, and is mostly grown under rainfed conditions. Recent climate conditions in Europe have been characterised by severe weather extremes, mostly in the form of record-breaking droughts in recent decades, which pose a major threat to regional spring barley production under rainfed conditions. An increase in unfavourable weather conditions during the most sensitive phenological phases of spring barley development around the summer months would result in further yield losses (Bindereif et al., 2021). Future climate projections indicate a decrease in summer precipitation and an increase in temperatures, which could affect the yield of spring cereals in particular.

In general, winter cereals show less yield variability than their spring counterparts. One reason for this is that they develop earlier, during a period of generally lower temperatures and higher soil moisture after winter.

Phenology is considered to be the most important trait for studying the impact of weather variability in the relevant developmental phases of crops. It can identify the critical phases and climatic elements which have the greatest impact on individual yield components or the total grain yield. This information is very important for management strategies, crop adaptation and breeding strategies to increase yield stability. In the face of climate change, agronomic strategies will enable farmers to avoid economic losses.

### Material and Methods

This study presents the relationship between weather variability and yield of spring barley (cv. Scarlett) based on meteorological data, phenological observations, grain yield and yield components from the agrometeorological field experiment in Berlin-Dahlem (Chmielewski and Köhn, 1999), between 2009 and 2022. The phenological observations according to the extended BBCH scale were used to separate four main developmental phases, P1: vegetative phase (BBCH 00-29), P2: ear formation phase (BBCH 30-49), P3: anthesis phase (BBCH 50-69), P4: grain filling phase (BBCH 70-99), related to the agronomic importance for yield establishment. To study the impact of weather on barley yield and its components, daily data of maximum, minimum and mean air temperature ( $T_x$ ,  $T_n$ ,  $T$ ), precipitation ( $P$ ), potential evapotranspiration ( $ET_p$ ), global radiation ( $G_r$ ), sunshine duration ( $SD$ ) and climatic water balance ( $CWB$ ) were calculated within the phenological phases. Correlation analysis was carried out to identify the meteorological variables that most influence yield. The variables with the highest correlation coefficients were used to describe the relationship between weather and yield in a multiple linear regression equation. To validate the obtained regression model, a cross-validation analysis was carried out for the experimental period (2009-2022).

### Results and Discussion

In this study, the time around ear formation and anthesis was identified as the most important phase, strongly related to grain yield. Based on a simple multiple regression equation, 82 % of the yield variability could be explained by  $T_x$  during ear formation and  $T_x$  and  $CWB$  during anthesis (Fig. 1). The

ear formation phase begins with the cessation of vegetative growth leading to the onset of reproductive development. This stage also marks the start of spikelet formation, the beginning of stem elongation and ear initiation, a key factor that is directly related to grain yield ( $Y_G$  in dt ha<sup>-1</sup>) (Ibrahim et al., 2016). The time and duration of anthesis are known to be the most important phenological phase in cereals, determining grain number ( $G_N$  in grains ear<sup>-1</sup>) and thus grain yield. During this phase, plants are highly sensitive to the main abiotic (air temperature and water shortage) and biotic (insects and diseases) stresses (Craufurd and Wheeler, 2009). Rötter et al. (2012) found that the most critical development periods in barley plants are the pre-anthesis and post-anthesis periods, and that significant yield losses occur at temperatures above 28-30 °C during these phases.

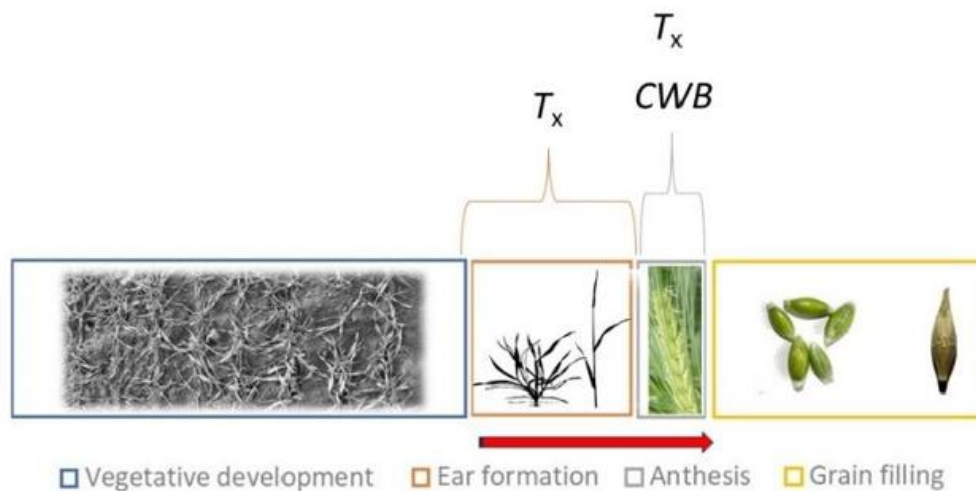


Fig. 1: Phenological phases and climate variables related to yield formation.

Maximum temperatures during ear formation have been identified as the most important factor affecting grain yield. This is indicated by the negative correlation between  $T_x$  and the number of ears per plant ( $E_p$ ) during this phase when, after stem elongation, the process of tiller reduction begins (Chmielewski and Köhn, 2000). Especially in years with high maximum temperatures during ear formation (2017, 2018:  $\Delta T_x=4.3$  K, 2019:  $\Delta T_x=3.7$  K above normal) low values for  $E_p$  and  $Y_G$  were observed.

In the subsequent anthesis phase, high maximum temperatures in combination with low precipitation (negative climatic water balance) shortened the duration of the anthesis phase and led to significant yield losses. Of all the yield components studied, ear yield ( $Y_E$ ) showed the closest relationship with the weather conditions during anthesis. In almost all years,  $Y_E$  responded to anomalies in maximum temperature and climatic water balance with ear yields (on average  $Y_E=0.76$  g ear<sup>-1</sup>) above or below normal, indirectly affecting the grain yield ( $Y_G$ ).

A good example was the hot and dry year 2018. Exceptionally dry conditions in this year during the pre-anthesis and anthesis phase ( $CWB=-20.7$  mm), combined with anomalies in maximum temperatures of  $\Delta T_x=9.2$  K, led to the lowest grain yield ( $Y_G=13.5$  dt ha<sup>-1</sup>) in the study period. This suggests that increasing temperatures and decreasing precipitation around anthesis could continue to significantly affect grain yield in spring barley in the future.

In contrast, the highest grain yield of 60.0 dt ha<sup>-1</sup> was observed in 2014, associated with a very early sowing date (28 February, 25 days earlier than normal). As a consequence, the vegetative phase lasted 8 days longer than normal. Ear formation and anthesis phase started significantly earlier (17 days and 9 days, respectively) and occurred during a period of generally lower temperatures. As a result, the maximum temperatures during ear formation and anthesis were 3.9 and 5.1 K lower than normal. In addition, sufficient precipitation during anthesis ( $P=37.8$  mm, 21 mm above normal) and thus a high positive climatic water balance ( $\Delta CWB=37.6$  mm above normal) also prevented any yield losses in this

phase. As a result, the spring barley plant was able to develop more tillers (prolonged vegetative period), resulting in the highest crop density ( $C_D=600$  ears  $m^{-2}$ ) and consequently the highest grain number ( $G_N=22.4$  grains ear $^{-1}$ ) due to a prolonged ear formation period of 8 days. This finally led to the second highest ear yield ( $Y_E=1.0$  g ear $^{-1}$ ) and consequently to the highest grain yield in the period studied.

### Conclusions

In conclusion, below normal maximum temperatures and good soil water availability around anthesis are at least crucial for good barley yields. This suggests that the 'escape strategy' may be beneficial for spring barley, allowing anthesis to take place during a generally cooler and wetter period in order to avoid summer drought. Early sowing also has the advantage of prolonging phenological phases, which last longer than normal due to generally lower temperatures. The use of an appropriate sowing window allows farmers to better manage climatic risks, where early sowing can be an advantage to avoid the pre-summer and summer drought. In addition, breeding progress may lead to greater heat and drought tolerance in spring barley varieties, potentially counteracting a significant shortening of developmental phases.

### References:

- BINDEREIF, S.G., RÜLL, F., KOLB, P., KÖBERLE, L., WILLMS, H., STEIDELE, S., SCHWARZINGER, S., GEBAUER, G., 2021: Impact of global climate change on the European barley market requires novel multi-method approaches to preserve crop quality and authenticity. *Foods* **10**, 1592.
- CHMIELEWSKI, F.M., KÖHN, W., 1999: Impact of weather on yield components of spring cereals over 30 years. *Agricultural and Forest Meteorology*, **96**: 49-58.
- CHMIELEWSKI, F.M., KÖHN, W., 2000: Impact of weather on yield components of winter rye over 30 years. *Agricultural and Forest Meteorology*, **102**: 253-261.
- CRAUFURD, P.Q., WHEELER, T.R., 2009: Climate change and the flowering time of annual crops. *Journal of Experimental Botany* **60**, 9: 2529-2539.
- IBRAHIM, A., HARRISON, M., MEINKE, H., ZHOU, M., 2016: Barley Phenology: Physiological and molecular mechanisms for heading date and modelling of genotype-environment management interactions. *Plant Growth Book, InTech* **11**: doi: 10.5772/64827.
- MACHOLDT, J., STYCZEN, M.E., MACDONALD, A., PIEPHO, H.P., HONERMEIER, B., 2020: Long-term analysis from a cropping system perspective: Yield stability, environmental adaptability, and production risk of winter barley. *European Journal of Agronomy* **117**, 126056.
- RÖTTER R.P., PALOSUO T., KERSEBAUM, K.C., ANGULO, C., BINDI, M., EWERT, F., FERRISE, R., HLAVINKA, P., MORIONDO, M., NENDEL, C., OLESEN, J.E., PATIL, R.H., RUGET, F., TAKÁČ, J., TRNKA, M., 2012: Simulation of spring barley yield in different climatic zones of Northern and Central Europe: A comparison of nine crop models, *Field Crops Research* **133**: 23-36.

**Keywords:** Spring barley, phenology, yield, drought, climate change

## N-Stabilisierung in der Düngepraxis: Optimierung durch Regionalisierung auf Basis meteorologisch-edaphischer Parameter StaPrax-Regio

*Dr. Denise Assmann<sup>1</sup>, Falk Böttcher<sup>1</sup>, Thomas Leppelt<sup>1</sup>, Dr. Kristina Fröhlich<sup>1</sup>, Amelie Hoff<sup>1</sup>, Dr. Thomas Kreuter<sup>2</sup>, Florian Eißner<sup>2</sup>, Dr. Enrico Thiel<sup>2</sup>, Johannes Döhler<sup>2</sup>, Franz-Leopold Haupt<sup>2</sup>, Dr. Michael Grunert<sup>3</sup>, Prof. Dr. Hardy Pundt<sup>4</sup>, Roksolana Pleshkanovska<sup>4</sup>*

<sup>1</sup>Deutscher Wetterdienst, Abteilung Phänologie, Dienstort Leipzig (Deutschland)

<sup>2</sup>SKW Stickstoffwerke Piesteritz GmbH (Deutschland)

<sup>3</sup>Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (Deutschland)

<sup>4</sup>Hochschule Harz (Deutschland)

Im Projekt StaPrax-Regio werden hocheffiziente N-stabilisierte (stickstoffstabilisierte) Düngungsstrategien auf Basis agrarmeteorologisch-bodenkundlicher Standortanalysen identifiziert und über innovative Beratungstools zeitnah in die Düngepraxis überführt. Das Ziel ist eine deutlich verbesserte Übertragung der vielfältigen und komplexen Vorteilseffekte der N-stabilisierten Düngung (Minderung von düngungsinduzierten Lachgas-, Ammoniak- und Nitratverlusten; Verbesserung der N-Verfügbarkeit, Förderung von Wurzel- und Jugendentwicklung) in adäquate Steigerungen der Dünger-N-Effizienz. Vor allem im Wintergetreide gelingt dies bislang nur unzureichend. Im Vorgängerprojekt StaPlaRes wurde nachgewiesen, dass bei optimaler Adaption der N-stabilisierten Düngung an Standort- und Witterungskonstellationen eine deutliche N-Effizienzsteigerung erreicht werden kann.

In den Versuchsjahren 2021-2023 wurden jeweils rund 70-90 Feldversuche (Exaktversuche, randomisiert Anordnung der Versuchsparzellen mit 4-fach-Wiederholung) an knapp 60 verschiedenen Standorten deutschlandweit in den Kulturen Winterweizen, Wintergerste und Winterroggen etabliert. Die Standortauswahl erfolgte unter Berücksichtigung einer möglichst hohen Repräsentativität typischer deutscher Ackerbauregionen. Eine Vielzahl von Landeskammern, Landesanstalten, Unternehmen des Agrarhandels, der Privatberatung, Hochschulen, Universitäten, Forschungseinrichtungen und private Dienstleistungsunternehmen setzten die Versuche um und ermöglichen dadurch einen direkten Wissenstransfer in die Landwirtschaftspraxis. Zur Gewährleistung einer einheitlichen Versuchsdurchführung und als Grundlage für spätere überregionale statistische Auswertungen der Exaktversuche wurden für alle drei Kulturarten einheitliche Versuchspläne und Versuchsprotokolle entwickelt und den Versuchsdurchführenden zur Verfügung gestellt.

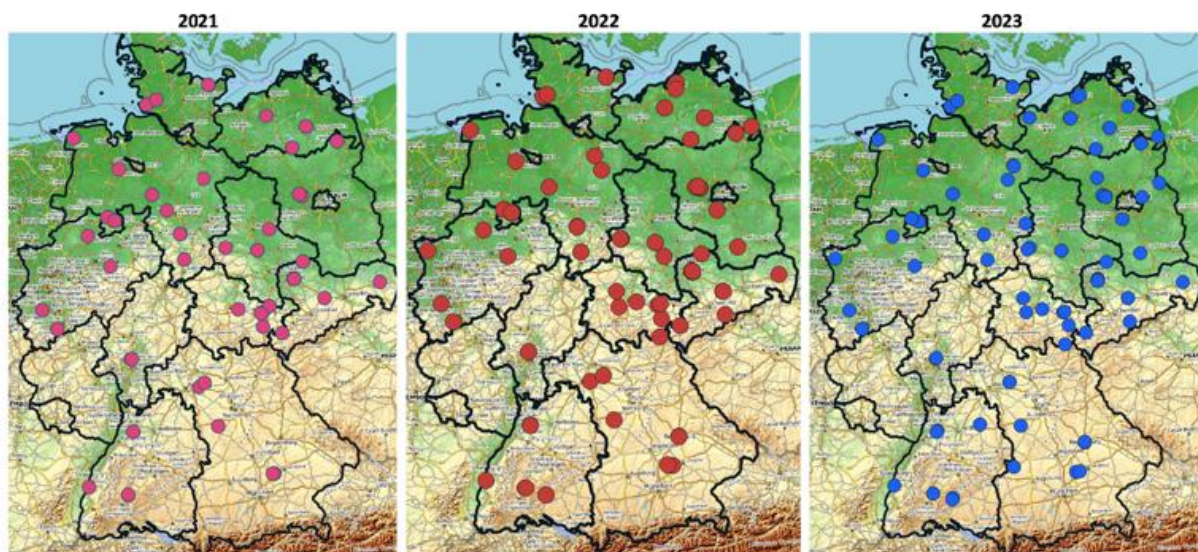


Abb. 1: Feldversuchsstandorte 2021-2023 im Projekt StaPrax-Regio.

Der Deutsche Wetterdienst erstellte für die Versuchsfelder mit verschiedenen Wintergetreidearten an den Standorten agrarmeteorologische Analysen. Die phänologischen Analysen wurden für verschiedene Phasen der Kulturen Dauergrünland, Winterweizen, Wintergerste, Winterroggen, Winterraps und Stachelbeere an den einzelnen Versuchsstandorten durchgeführt. Jedem Versuchsstandort wurde die entsprechende Naturraumgruppe zugeordnet und alle phänologischen Beobachtungen der entsprechenden landwirtschaftlichen Kulturpflanzenart und Entwicklungsphase im Umkreis von 50 km des Versuchsfeldes analysiert. Für jede Kulturpflanzenart und Entwicklungsphase wurde der repräsentative Tag des Jahres im Zeitraum 2006-2020 und 2016-2020 ermittelt. Berücksichtigt wurden nur Datensätze, die eine ausreichende statistische Signifikanz auswiesen. Dank der ausgezeichneten Datenlage des DWD konnten im Zeitraum 2006-2020 für 100% und im Zeitraum 2016-2020 für ca. 90% der Kulturpflanzenarten und Entwicklungsphasen diese Tage bestimmt werden.

Für die meteorologische Auswertung wurde jedem Versuchsstandort eine repräsentative Wetterstation unter Berücksichtigung der Entfernung, Höhenlage und topographischer Umgebung zugeordnet. Neben dem Vegetationsbeginn, der Niederschlagssumme, der mittleren Lufttemperatur und der Summe der Globalstrahlung, wurden auch die Stunden mittlerer Windgeschwindigkeit oberhalb von 3 und 5 m/s ermittelt. Die zeitliche Einteilung wurde wie folgt festgelegt: 2020, 2021, 2006-2020 und 2016-2020. Dabei wurde diese Einteilung nochmal jeweils unterteilt in Dekaden, Monate, Vegetationszeit (01.01.-31.07.) und Jahreswerte.

Auf der Basis von Messwerten wurden Modellierungen mit den agrarmeteorologischen Wirkmodellen AMBAV (AgrarMeteorologische Berechnung der Aktuellen Verdunstung) und BEKLIMA (BestandsKLIMA) für bodenbezogene Parameter wie z.B. Bodenfeuchte, Sickerwassermenge und Bodentemperatur analog zu den meteorologischen Messwerten ausgewertet.

Da Messungen der Bodenfeuchte und Bodentemperatur standardmäßig unter landwirtschaftlichen Flächen nicht vorliegen, wurden während der Projektlaufzeit ergänzend zu den Modellberechnungen 18 Messsonden (Drill & Drop 90 cm moisture PLUS) der Firma SENTEK an einigen Versuchsstandorten für die Projektlaufzeit unter Winterweizen eingesetzt. Die SENTEK-Sonden liefern Informationen über die mittlere Bodenfeuchte und Bodentemperatur in stündlicher Auflösung und sind essenziell, um die Modellberechnungen mit AMBER und BEKLIMA zu evaluieren.

Die Abbildung 2 zeigt den Vergleich von Messung und Modellierung an drei ausgewählten Standorten des Projektes StaPraxRegio im Versuchsjahr 2021: Barlt (Diagramme oben; leichter Boden – Hauptbestandteil: Sand), Berge (Diagramme Bildmitte; mittlerer Boden – Hauptbestandteil: Lehm/Schluff), Bernburg (Diagramme unten; schwerer Boden – Hauptbestandteil: Ton).

In der linken Spalte sind die Vergleiche der mittleren Bodenfeuchte in 0-90 cm zwischen dem Modell AMBAV (orange) und den Messungen der SENTEK-Sonden (blau) abgebildet. In der rechten Spalte sind die Vergleiche der mittleren Bodentemperatur in 0-30 cm zwischen dem Modell BEKLIMA (orange) und den Messungen der SENTEK-Sonden (blau) abgebildet.

Insgesamt werden die Bodenfeuchte und die Bodentemperatur sehr gut von den Modellen wiederspiegelt. Vor allem die Kurven der modellierten und gemessenen mittleren Bodentemperatur sind bis Tag 170 nahezu deckungsgleich. Ab Tag 170 weicht das Modell am Standort Barlt minimal zu höheren Temperaturen und an den Standorten Berge und Bernburg minimal zu niedrigeren Temperaturen ab. Eine mögliche Ursache ist, dass das Modell BEKLIMA zu sensibel auf Änderungen der Umgebungsvariablen reagiert.

Der Verlauf der Bodenfeuchte in 0-90 cm wird ebenfalls vom Modell AMBAV gut wiedergegeben. Vor allem Regenereignisse, die mit einem sprunghaften Anstieg der Bodenfeuchte verbunden sind (siehe z.B. Berge und Bernburg, Tag 180 des Jahres 2021), werden vom Modell für die unterschiedlichen Bodentypen zeitlich genau und in der Größenordnung gut erfasst.

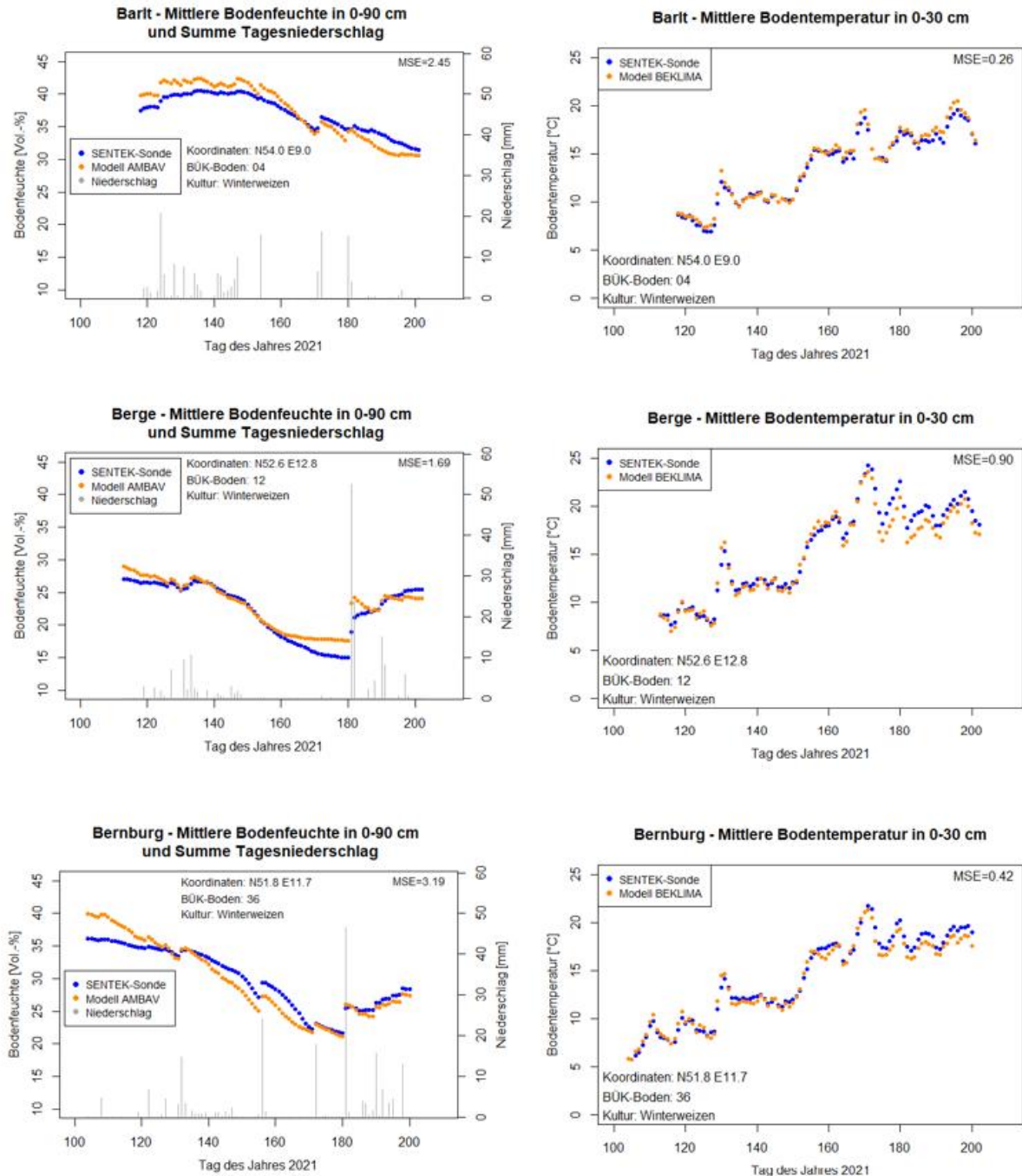


Abb. 2: Vergleich Messungen SENTEK-Sonden (blau) mit den Modellen AMBAV und BEKLIMA (jeweils orange) für Bodenfeuchte in 0-90 cm (linke Spalte) mit den Tagessummen des Niederschlags (grau, sekundäre y-Achse) und Bodentemperatur 0-30 cm (rechte Spalte) an drei Standorten: Barlt – leichter Boden (oben), Berge – mittlerer Boden (Mitte) und Bernburg – schwerer Boden (unten) im Versuchsjahr 2021.

Abweichungen zu Beginn des Messzeitraums sind durch den Einbau der Messsonde begründet; diese braucht einige Tage, um sich präzise auf die Umgebungsfeuchte einzustellen. Abweichungen im späteren Messbereich sind durch Modellungenauigkeiten begründet. Hauptpunkte dafür sind die Bodenschichtung, die innerhalb einer Versuchsfläche sehr variabel sein kann, sowie die komplexe und individuelle Wurzelentwicklung der einzelnen Pflanzen, die nur vereinfacht und vereinheitlicht im Modell parametrisiert werden kann.

Insgesamt sind die Ergebnisse des Vergleichs sehr positiv zu bewerten. Abweichungen von Modell und Messung sind minimal und Schwankungen werden zeitgenau und in gleichen Größenbereichen wiedergegeben. Für die mittlere Bodentemperatur in 0-30 cm liegt die mittlere quadratische Abweichung für alle drei Standorte unter dem Wert 1 für die mittlere Bodenfeuchte in 0-90 cm zwischen 1 und 8. Für beide Parameter zeigen die Modelle BEKLIMA und AMBAV somit eine sehr hohe Genauigkeit.

Neben der Modellevaluierung durch die während des Projektes gewonnenen Messwerte (Einbau und Betrieb von Messsonden), werden mit diesen und den standörtlichen Analysen, deutschlandweite regionalisierte Aussagen zu Witterungsverläufen, Temperaturen, Niederschlägen, Bodenfeuchten, Bodenwasser-Austauschraten und zur phänologischen Entwicklung (Hauptkulturen) während der Hauptdüngungsperiode gewonnen.

In Verknüpfung dieser Arbeiten mit parallelen bodenkundlichen und pflanzenbaulichen Analysen werden standortspezifische optimale Düngestrategien identifiziert und in die Praxis überführt: unter anderem wurden vorhandene Beratungstools (z.B. BESyD) weiterentwickelt.

Um auch saisonalen Einflüssen Rechnung zu tragen, wird ein agrarmeteorologisches Wirkmodell in der AMBER-Umgebung entwickelt, welches rechtzeitig (möglichst einige Wochen) vor jeder anstehenden Düngungsmaßnahme als zusätzliche agrarmeteorologische Entscheidungshilfe dienen soll. Dafür sollen die meteorologischen Kalkulationen des GCFS2.1 (German Climate Forecast System) für die saisonale Vorhersage und das EZMW (Europäisches Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage) für die Witterungsvorhersage genutzt werden. Es erfolgte ein empirisch-statistisches Herunterskalieren der Daten mit der beim DWD entwickelten Methode EPISODES, welche dann als Eingangsparameter für das AMBER dienen. Für jeden Vorhersagelauf werden 50 mögliche Vorhersagen in die Zukunft gerechnet. Aus diesen Vorhersagen werden dann für die Düngung relevante Termine ermittelt, wie z.B. den Vegetationsbeginn oder verschiedene Pflanzenstadien über die Temperatursumme. Für diese ermittelten Termine wird dann die meteorologische und bodenphysikalische Situation ausgewertet, um den optimalen Düngetermin an einzelnen Standorten in Deutschland zu bestimmen.

#### **Literatur:**

FRÖHLICH, K., DOBRYNIN, M., ISENSEE, K., GESSNER, C., PAXIAN, A., POHLMANN, H., et al. (2021). The german climate forecast system: GCFS. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, **13**, e2020MS002101. <https://doi.org/10.1029/2020MS002101>.

KREIENKAMP, F., PAXIAN, A., FRÜH, B. et al. Evaluation of the empirical–statistical downscaling method EPISODES. *Clim Dyn* **52**, 991–1026 (2019). <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4276-2>.

**Schlüsselwörter:** Landwirtschaft, Düngung, Bodenfeuchte, AMBAV, Witterungsvorhersage, Jahreszeitenvorhersage

## Müssen Treibhausgasemissionen und Verdunstungsraten über dem Freiwasserbereich ausgedehnter Wasserflächen neu bewertet werden?

*Uwe Spank<sup>1</sup>, Matthias Mauder<sup>1</sup>, Patrick Aurich<sup>2</sup>, Christian Bernhofer<sup>1</sup> und Matthias Koschorreck<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>TU-Dresden, Institut für Hydrologie und Meteorologie, Professur für Meteorologie, Tharandt (Deutschland)

<sup>2</sup>Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH - UFZ, Department für Seenforschung, Magdeburg (Deutschland)

Die korrekte Quantifizierung des Stoff- und Energieaustauschs zwischen Wasseroberflächen und Atmosphäre war schon immer Grundvoraussetzung für eine nachhaltige Bewirtschaftung von Seen und Talsperren. Die zugrundeliegenden Prozesse genau verstehen und modellieren zu können, gewinnt jedoch in Anbetracht der globalen Wasserverknappung als Folge des Klimawandels und des drastisch steigenden Wasserbedarfs durch die wachsende Weltbevölkerung deutlich an Bedeutung.

In unseren von der DFG geförderten Forschungsprojekten TREGATA und MEDIWA wurden die zwischen der Wasseroberfläche und der Atmosphäre auftretenden Stoff- und Energieflüsse sowie die zugrundeliegenden Prozesse eingehend an zwei Talsperren mit unterschiedlichen limnologischen Bedingungen (Rappbode-Talsperre, oligotroph vs. Talsperre Bautzen, hypereutroph) untersucht. Ein schwimmendes Freilandlabor (Abb. 1) mit einer Vielzahl an hydrochemischen, hydrophysikalischen und mikrometeorologischen Messsystemen stellte ein umfassendes Sortiment an Messdaten bereit und lieferte ein nahezu vollständiges Bild des Energie- und des Kohlenstoffaustauschs des Gewässers mit der Atmosphäre (Spank et al., 2022; Spank et al., 2023). Besonderes Augenmerk wurde, neben der korrekten Erhebung und der genauen Quantifizierung von unvermeidbaren Messunsicherheiten, auf die Erfassung der räumlichen Heterogenität sowohl der auftretenden Flüsse als auch der steuernden limnologischen und meteorologischen Umweltgrößen gelegt.



Abb. 1: Schwimmendes Freilandlabor zum Monitoring des Stoff- und Energieaustauschs zwischen Wasseroberfläche und Atmosphäre beim Einsatz auf der Talsperre Bautzen, April 2018.

Unseren Tagungsbeitrag widmen wir speziell den mittels des schwimmenden Eddy-Kovarianz- (EC-) Messsystems erhobenen Datenreihen der Kohlendioxid-, Methan- und Wasserdampf Flüsse über dem Pelagialbereich der beiden Talsperren. Die Kohlendioxidflüsse (Abb. 2) zeigten eine enorme zeitliche Variabilität, die selbst Vorzeichenwechsel beinhaltete. Die genauen Ursachen der auf den unterschiedlichen Zeitskalen beobachteten Dynamik sind noch nicht abschließend geklärt. Jedoch

konnten Effekte von Mikrostratifikationen als auch die Wirkung von internen Wellen (Seiches) und anderen Zirkulationssystemen im Wasserkörper (z.B. Up- und Down-Welling) auf die gemessenen Kohlendioxidflüsse nachgewiesen werden. Besonders überraschend waren die Unterschiede auf jährlicher Zeitskala.

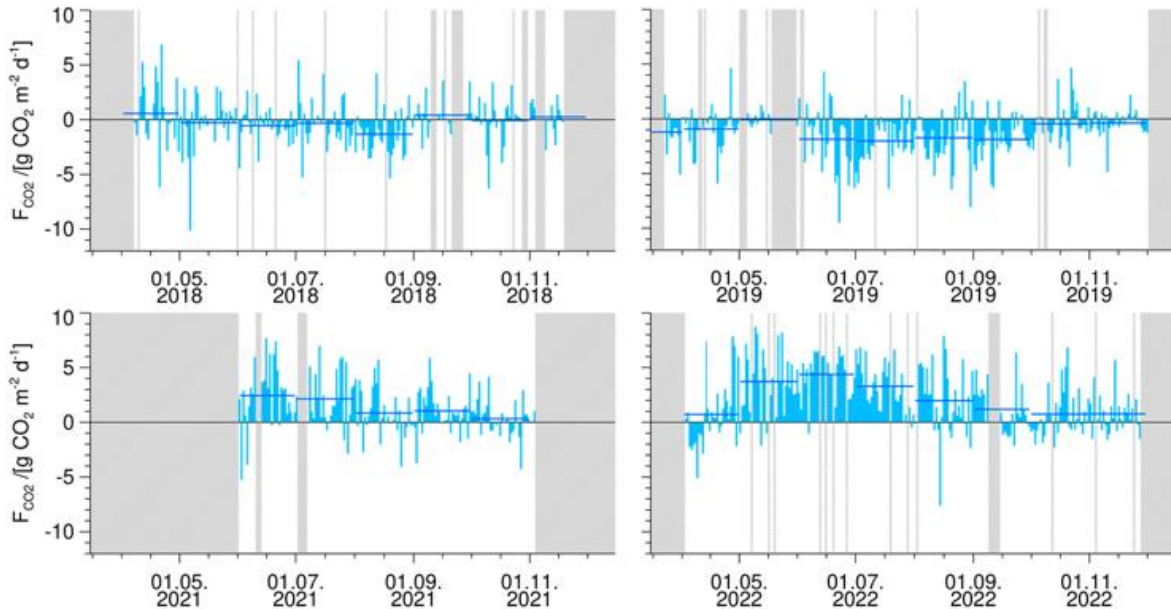


Abb. 2: Über dem Pelagialbereich der Talsperre Bautzen in den Jahren 2018, 2019, 2021 und 2022 mittels der Eddy-Kovarianz-Technik gemessene Tageswerte des Kohlendioxidflusses, monatliche Mittelwerte sind als horizontale Linie dargestellt.

Die beobachteten Methanemissionen (Abb. 3) zeigten im Vergleich zu den Kohlendioxidflüssen ein recht konsistentes Muster zwischen den einzelnen Jahren und waren durch einen ausgeprägten Jahresgang mit einem deutlichen Maximum während der Sommerstagnation gekennzeichnet.

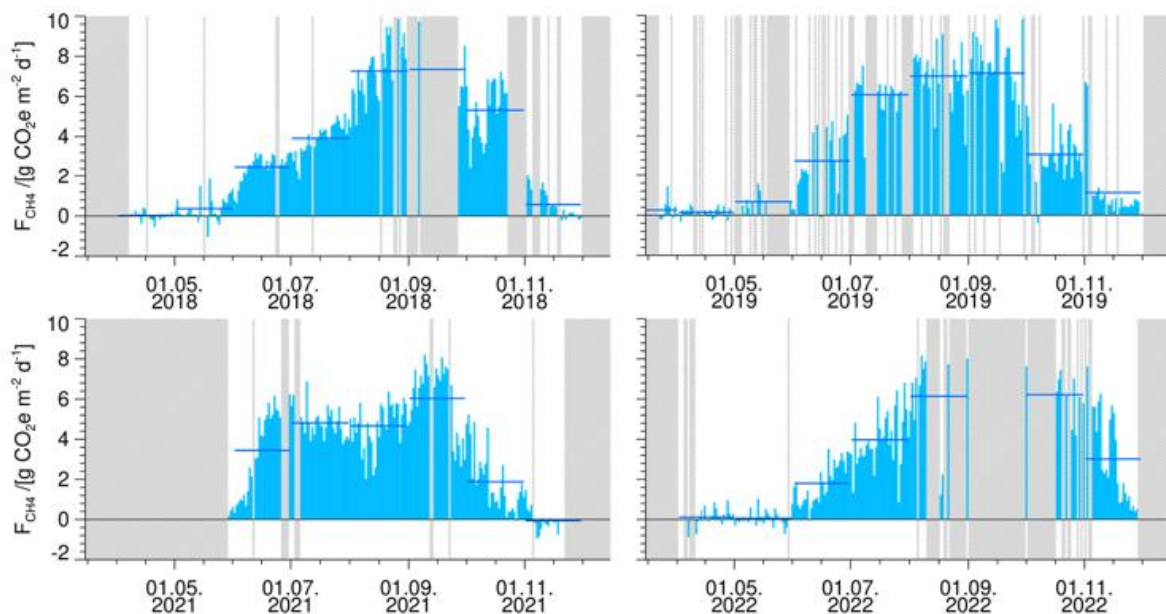


Abb. 3: Über dem Pelagialbereich der Talsperre Bautzen in den Jahren 2018, 2019, 2021 und 2022 mittels der Eddy-Kovarianz-Technik gemessene tägliche Methanemissionen als Kohlendioxid-Äquivalente, monatliche Mittelwerte sind als horizontale Linie dargestellt.

Dieses sommerliche Maximum korreliert mit der erhöhten Wassertemperatur und der beschränkten Verfügbarkeit von Sauerstoff im Hypolimnion zu dieser Zeit. Insgesamt lagen die Methanemissionen über dem Freiwasserbereich aber auch im Worst-Case der untersuchten hypereutrophen Talsperre deutlich unter den Emissionen, die von Sümpfen und Röhrichtbeständen berichtet werden. Die gemessenen Methanemissionen machen jedoch im Zusammenhang mit dem deutlich höheren Treibhausgaspotential von Methan im Vergleich zu Kohlendioxid auch deutlich, dass ein eutrophes Gewässer immer eine Nettoquelle für Kohlendioxidäquivalente ist und, dass Maßnahmen zur Verbesserung der Wassergüte gleichzeitig auch zum Klimaschutz beitragen.

Ein besonders überraschendes Ergebnis waren die vergleichsweise kleinen Verdunstungsraten über dem Freiwasserbereich der Talsperre (Abb. 4). So war die gemessene Verdunstung deutlich kleiner, als sie mit gängigen Verdunstungsformeln vorhergesagt wird, und entsprach nur etwa der Hälfte der Verdunstung eines gut mit Wasser versorgten Wiesenstandorts.

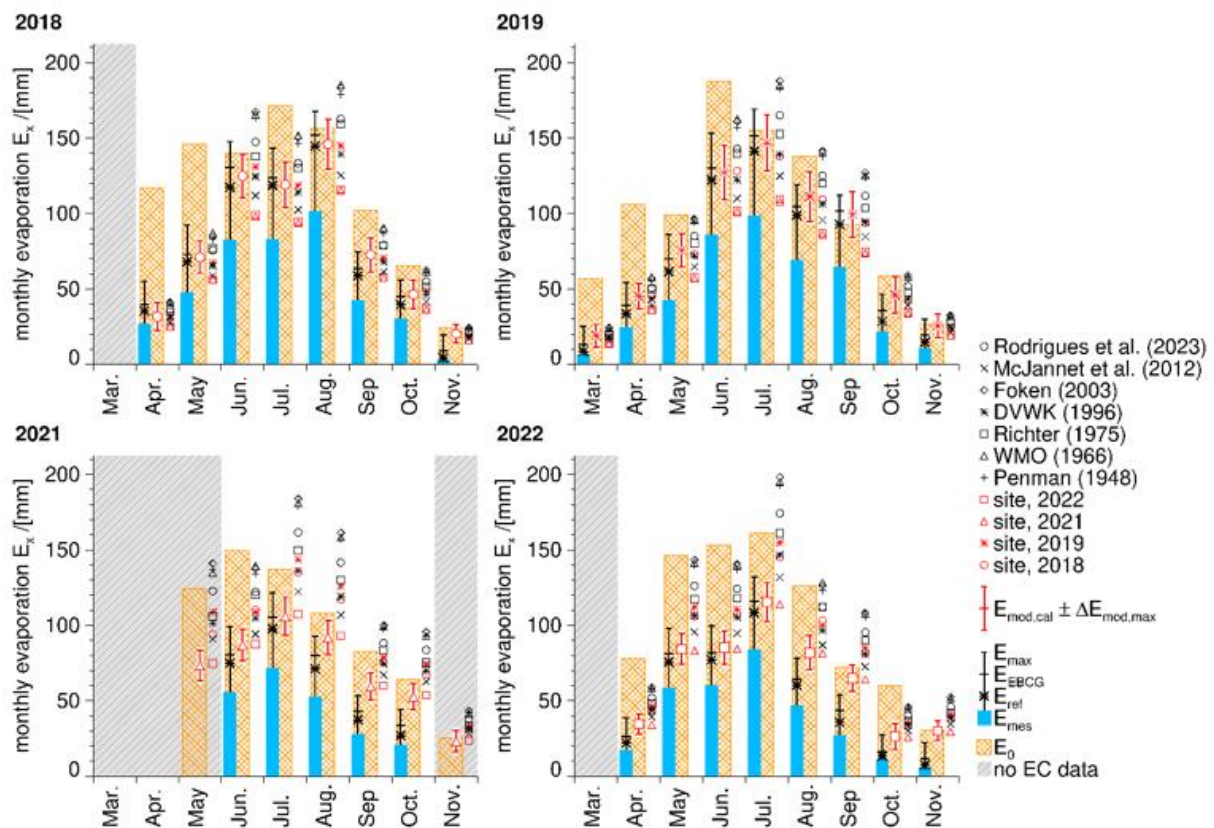


Abb. 4: Aus Eddy-Kovarianz-Messdaten abgeleitete monatliche Verdunstungsraten ( $E_{mes}$ ) für den Pelagialbereich der Talsperre Bautzen inklusive der Schließungslücken-korrigierten Verdunstungsraten ( $E_{ref}$ ) und der zugehörigen Unsicherheitsbereiche ( $E_{EBCG}$ : maximaler Schließungslückenfehler,  $E_{max}$ : physikalisch maximal möglicher Messfehler inklusive des potentiellen Maximalfehlers bei der Strahlungsmessung), Gras-Referenzverdunstung ( $E_0$ ) nach Allen et al. (1998) und Verdunstungsabschätzungen basierend auf dem Dalton-Ansatz mit unterschiedlichen Parametrisierungen (‘site’ kennzeichnet die Simulationen basierend auf standortsspezifisch-kalibrierten Parametrisierungen des Dalton-Ansatzes,  $E_{mod}$  kennzeichnet die Modellläufe für die jeweilige Kalibrierungsperiode inklusive der potentiellen Unsicherheiten, die sich aus möglichen Messfehlern in den Eingangsdaten ergeben, die weiteren Simulationen zeigen die Simulationsergebnisse mit Parametrisierungen der benannten Autoren).

Messfehler in den zugrundeliegenden Daten und sowie die für EC-Daten typische Energiebilanzschließungslücke können diese Abweichung nur zu einem Teil erklären. Vielmehr indiziert sich, dass räumliche Variationen in den verdunstungssteuernden Umweltgrößen eine deutliche räumliche Heterogenität in den auftretenden Verdunstungsraten bewirken und dass die Uferbereiche überproportional zur Gesamtverdunstung eines Gewässers beitragen. Unsere Messungen machen

deutlich, dass die standartmäßigen Methoden zur Abschätzung von Verdunstungsraten von Gewässern überdacht werden müssen, was insbesondere für die erfolgreiche Umsetzung von Flutungsvorhaben ehemaliger Tagebaue von großer Bedeutung ist.

#### **Literatur:**

- ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D., SMITH, M., 1998: FAO irrigation and drainage paper no. 56. Rome Italy.
- DVWK, 1996: Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. DVWK Merkblätter Nr. 238
- FOKEN, T., 2003: Angewandte Meteorologie, Mikrometeorologische Methoden. ISBN 3-540-00322-3 Springer Berlin Heidelberg New York, 289 S.
- PENMAN, H., 1948: Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass. Proc. R. Soc. Lond. Ser. -Math. Phys. Sci. 193, <https://doi.org/10.1098/rspa.1948.0037>
- MCJANNET, D.L., WEBSTER, I.T., COOK, F.J., 2012: An area-dependent wind function for estimating open water evaporation using land-based meteorological data. Environ. Model. Softw. 31, 76–83. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.11.017>
- MCMAHON, T.A., PEEL, M.C., LOWE, L., SRIKANTHAN, R., MCVICAR, T.R., 2013: Estimating actual, potential, reference crop and pan evaporation using standard meteorological data: a pragmatic synthesis. Hydrol. Earth Syst. Sci. 17, 1331–1363. <https://doi.org/10.5194/hess-17-1331-2013>
- RICHTER, D., 1975: Vergleichende Betrachtung verschiedener Methoden zur Bestimmung der Verdunstung von freien Wasserflächen, Zeitschr. F. Meteorol 255(12), 117-121
- RODRIGUES, G.P., RODRIGUES, Í.S., RAABE, A., HOLSTEIN, P., DE ARAÚJO, J.C., 2023: Direct measurement of open-water evaporation: a newly developed sensor applied to a Brazilian tropical reservoir. Hydrol. Sci. J. 68, 379–394. <https://doi.org/10.1080/02626667.2022.2157278>
- SPANK, U., BERNHOFER, C., MAUDER, M., KELLER, P.S., KOSCHORRECK, M., 2023: Contrasting temporal dynamics of methane and carbon dioxide emissions from a eutrophic reservoir detected by eddy covariance measurements. Meteorol. Z. 32(4), 317–342. <https://doi.org/10.1127/metz/2023/1162>
- SPANK, U., HEHN, M., KELLER, P., KOSCHORRECK, M., BERNHOFER, C., 2020: A Season of Eddy-Covariance Fluxes Above an Extensive Water Body Based on Observations from a Floating Platform. Bound.-Layer Meteorol. 174, 433–464. <https://doi.org/10.1007/s10546-019-00490-z>
- WMO, 1966: Measurement and estimation of evaporation and evapotranspiration, Technical Note No. 83, 1966, 121 S.

**Schlüsselwörter:** Eddy Kovarianz, Fehler- und Unsicherheitsanalyse, Gewässerverdunstung, Kohlenstoffbilanz, Methan- und Kohlendioxidemissionen, Wasserhaushalts

## **Einfluss der globalen Erwärmung auf die Haltung landwirtschaftlicher Nutztiere in Stallungen**

***Günther Schaubberger***

AG Umweltgesundheit, Veterinärmedizinische Universität Wien (Österreich)

Die Haltung von Schweinen (Mast- und Zuchtschweine) und Hühnern (Mast- und Legehühner) erfolgt in Europa zumeist in geschlossenen Stallungen. Diese Gebäude müssen mit einer Lüftungstechnischen Anlage LTA ausgestattet sein, um die Tiere ausreichend mit Frischluft zu versorgen. In der kalten Jahreszeit hat die LTA die Aufgabe, die Zufuhr von Frischluft so weit zu reduzieren, dass einerseits die Stalltemperatur der Tiere im Optimalbereich liegt und andererseits die Luftqualität ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{PM}$ , etc.) den Anforderungen der Tiere entspricht. Im Sommerhalbjahr dient die LTA dazu, die von den Tieren abgegebene sensible Wärme aus dem Stall abzuführen. Damit liegt die Stalltemperatur im Sommer generell etwa  $3^\circ\text{C}$  bis  $5^\circ\text{C}$  über der Außentemperatur, wodurch die Resilienz des Stalles im Hinblick auf die Klimaerwärmung reduziert ist.

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Tierproduktion können nicht unmittelbar aus den Klimamodellen abgeleitet werden, sondern bedürfen zusätzlicher komplexer Stallklimamodelle, die die Kopplung zwischen den Außenbedingungen und dem Lebensraum der Tiere im Stall berücksichtigen. Das verwendete Simulationsmodell beschreibt den Zusammenhang zwischen Tierbestand, LTA und thermischen Gebäudeeigenschaften (Schaubberger et al., 1999, 2000). Die Simulation des Stallklimas wurde für ein geschlossenes Stallgebäude mit mechanischer Belüftung für 1800 Mastschweine vorgenommen und für den Zeitraum zwischen 1981 und 2017 berechnet. Das Modell wird durch meteorologische Daten (Stundenwerte) angetrieben und liefert die thermisch-hygrischen Parameter und der Luftqualität des Stalles. Die Beurteilung, ob Hitzestress HS für die Tiere auftritt, erfolgt anhand von Parametern wie z.B. dem Temperatur-Humidity-Index THI oder der Überschreitung einer Schwelle der Stalltemperatur. Die Simulation über diese 37 Jahre zeigt einen Anstieg der HS-Parameter im Bereich zwischen 0,9 und 6,4% pro Jahr seit 1981 (Mikovits et al., 2019).

Um diesen HS zu reduzieren wurden Adaptationsmaßnahmen auf ihre Tauglichkeit untersucht (Schaubberger et al., 2020). Dazu zählen energiesparende Luftaufbereitungssysteme (z.B. evaporative Kühlung), Maßnahmen, die die Gebäudeeigenschaften umfassen (z.B. Orientierung, Dachbegrünung), Maßnahmen, die das Mikroklima modifizieren (z.B. Hochdruckvernebelung) und Managementmaßnahmen (z.B. Fütterung) (Abb. 1 und 2). Die Wirksamkeit der verschiedenen Adaptationsmaßnahmen variiert stark: Luftaufbereitungssysteme, die die Zuluft kühlen, zeigten die höchste Reduktion von HS, während Maßnahmen zur Reduzierung der Wärmeabgabe der Tiere (z.B. geringere Tierdichte, höhere Lüftungsrate) am schlechtesten abschnitten. In geschlossenen Stallungen kann die Reduzierung von HS durch Adaptationsmaßnahmen auch betriebswirtschaftliche Verluste verringern und damit (Schaubberger et al., 1999, 2000, 2001) als Beitrag zur Stärkung der ökonomischen Resilienz der Landwirte gesehen werden.

Der ökonomische Einfluss von HS auf die Tierhaltung wurde durch die Beziehung zwischen einem HS-Index, der auf dem Temperatur-Feuchtigkeits-Index (THI) basiert, und der Reduktion des Deckungsbeitrags berechnet. Aus der Wahrscheinlichkeit von HS wurden die dadurch bedingten ökonomischen Auswirkungen anhand der Wahrscheinlichkeit des ökonomischen Risikos bestimmt. Die Reduktion des Deckungsbeitrags für eine 10-jährige Wiederkehrperiode wurde für 1980 mit 0,27 € pro Jahr pro Tierplatz ermittelt und stieg bis 2030 um das Zwanzigfache auf 5,13 € pro Jahr pro Tierplatz an (Schaubberger et al., 2021). Auch im Hinblick auf ökonomische Auswirkungen sind Adaptationsmaßnahmen geeignet, die Risiken, die durch HS hervorgerufen werden, zu reduzieren (Schaubberger et al., 2022).

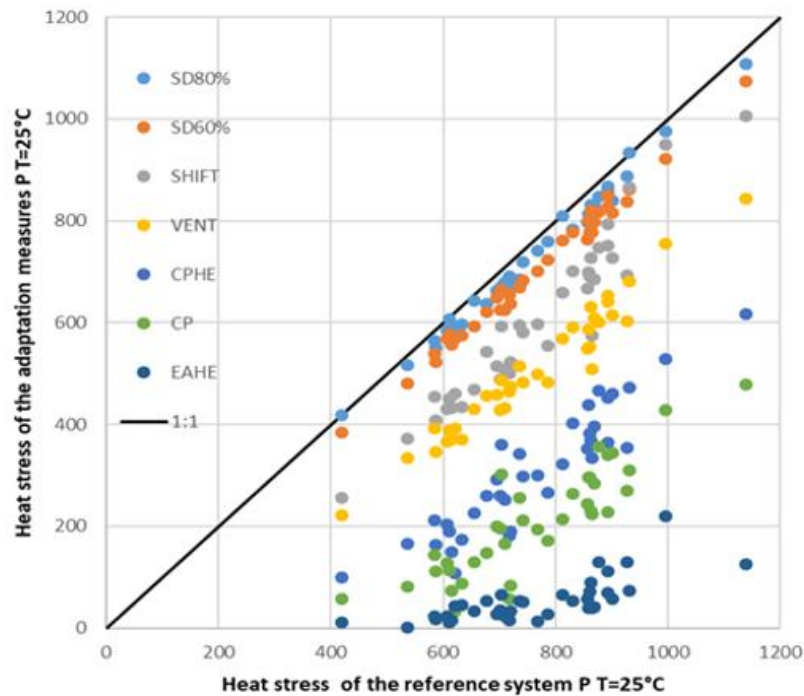


Abb. 1: Überschreitungshäufigkeit  $P$  (h/a) für eine Schwelle der Stalltemperatur von  $25^{\circ}\text{C}$  für unterschiedliche Adaptationsmaßnahmen in Abhängigkeit von einem Referenzstall für Schweinemast zwischen 1981 und 2017. Adaptationsmaßnahmen: Bestandsdichtereduktion auf SD80% und SD60%, Verschiebung der Ruhe- und Aktivitätszeiten der Tiere SHIFT, Verdopplung der Lüftungsrate VENT, Coolingpads und Wärmetauscher CPHE, Coolingpads CP und Erdwärmetauscher EAHE (aus: Schauburger et al., 2020).

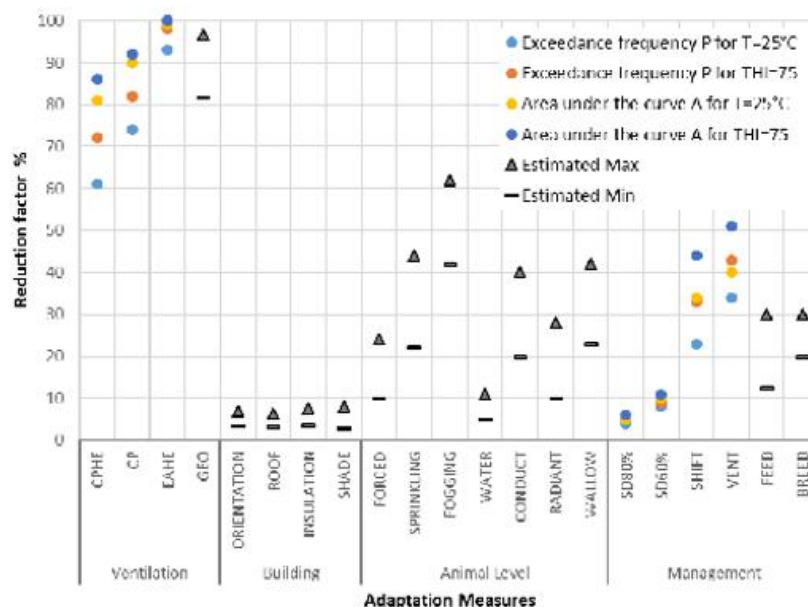


Abb. 2: Reduktionsfaktor von Hitzestress, ermittelt für Adaptationsmaßnahmen anhand simulierter (Überschreitungshäufigkeit  $P$  (h/a) und Fläche unter der Kurve A für einen Stalltemperaturschwelle von  $25^{\circ}\text{C}$  und einen THI-Schwellenwert von 75) und geschätzter Werte. Folgenden Adaptationsmaßnahmen wurden untersucht: Lüftungssystem: Coolingpads und Wärmetauscher CPHE, Coolingpads CP und Erdluftwärmetauscher EAHE, sowie geothermische Kühlung durch Grundwasser GEO; Gebäude: Ausrichtung des Gebäudes ORIENTATION, grüne Fassade / Dachberegnung ROOF, Isolierung der Gebäude INSULATION, Beschattung durch Pflanzen SHADE; Tierhaltung: erhöhte Luftgeschwindigkeit FORCED, Beregnung SPRINKLING, Vernebelung FOGGING, gekühltes Trinkwasser WATER, gekühlter Liegebereich CONDUCT, Strahlungskühlung RADIANT, Suhle WALLOW; Management: Bestandsdichtereduktion SD80% und SD60%, zeitliche Verschiebung der Ruhe- und Aktivitätszeiten SHIFT, Verdopplung der Lüftungsrate VENT, Fütterungsstrategien FEED und angepasste Rassen BREED (aus: Schauburger et al., 2020).

Neben den Auswirkungen von HS auf die Tiere hat die globale Erwärmung auch Auswirkungen auf die Emission von Ammoniak und Geruchstoffen des Stalles (Blanes-Vidal et al., 2012). Während Umweltgeruch hauptsächlich auf lokaler Ebene relevant ist und Anwohner belästigen kann, ist  $\text{NH}_3$  vorwiegend als Schadstoff auf regionaler Ebene von Bedeutung, da er ein wichtiger Vorläufer für die Bildung von Feinstaubpartikeln in der Atmosphäre ist (Wyer et al., 2022). Für die Ammoniak- und Geruchstoffemissionen wurde ein relativer Anstieg von 1.6% pro Dekade bestimmt. In Europa wurden die  $\text{NH}_3$ -Emissionen zwischen 1990 und 2015 um 23% reduziert. Das Signal der globalen Erwärmung wirkte dieser Reduktion in Höhe von 4% während dieses Zeitraums entgegen, was bedeutet, dass die Gesamtreduktion der Ammoniakemissionen nur 19% betrug.

Die Kommunikation über den Klimawandel im Kontext der landwirtschaftlichen Tierhaltung bezieht sich oft auf meteorologische Parameter (z.B. Anzahl der Hitzetage, Anstieg der Monatsmitteltemperatur) oder ökonomische Verluste auf nationaler Ebene. Weder geben die berichteten HS-Parameter ein schlüssiges Bild, noch können die makroökonomischen Zahlen direkt von Landwirten für Managemententscheidungen genutzt werden. Das Herunterbrechen der Auswirkungen der globalen Erwärmung auf die Tierhaltung ist ein wichtiger Beitrag, um das Verständnis und die Akzeptanz von notwendigen politischen Maßnahmen zu erhöhen. Besonders die ökonomischen Auswirkungen von HS stellen eine Entscheidungshilfe für Investition in Adaptationsmaßnahmen für die Landwirte dar. Die Ergebnisse dieser ökonomischen Abschätzung können auch landtechnische Unternehmen unterstützen, Innovationsfelder hinsichtlich ihrer Wirksamkeit, Ressourcenintensität und Kosten zu identifizieren.

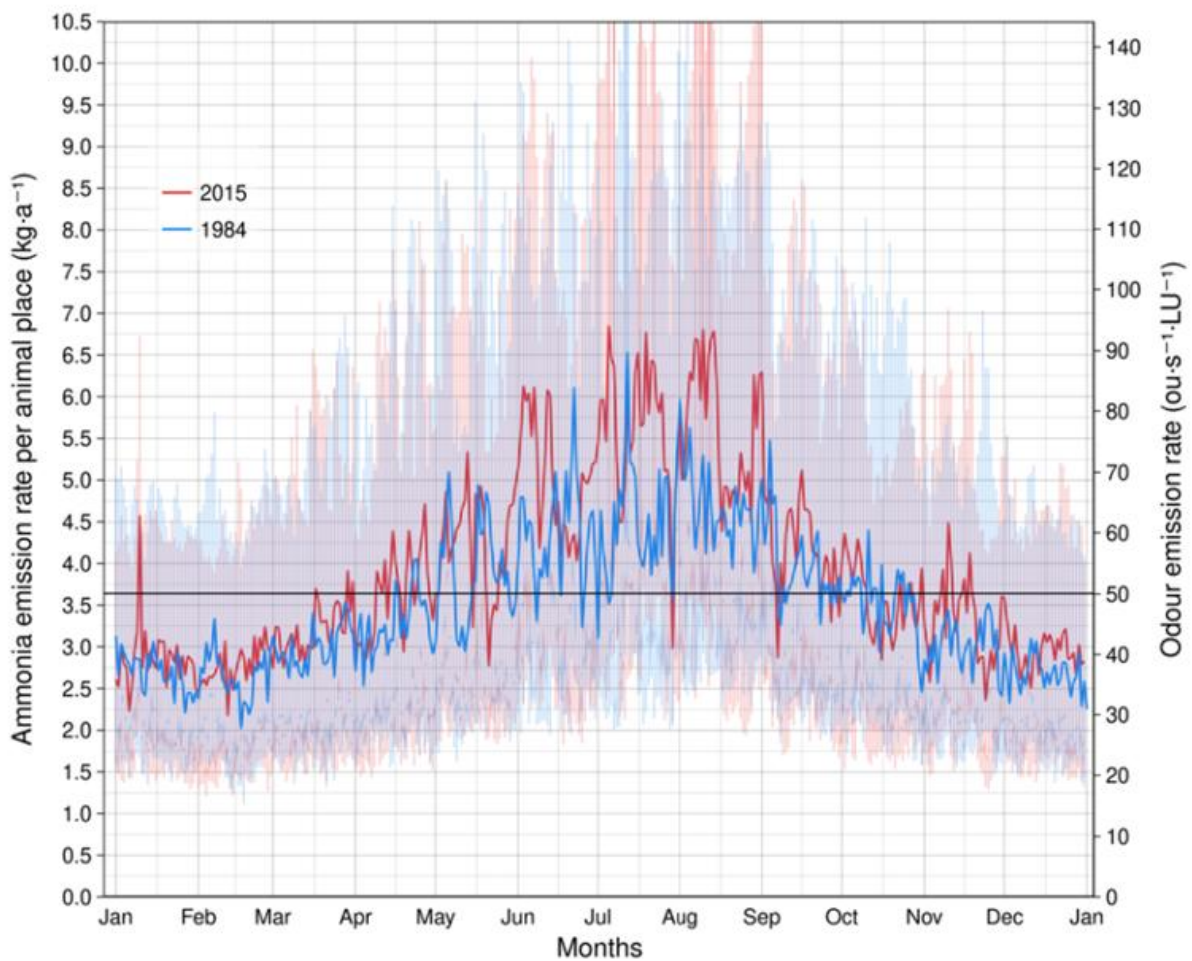


Abb. 3: Zeitlicher Verlauf der  $\text{NH}_3$ -Emissionsrate pro Tierplatz  $e_{\text{NH}_3}$  ( $\text{kg a}^{-1}$ ) und der auf die Körpermasse bezogenen Geruchsemissionsrate  $e_{\text{OD}}$  ( $\text{ou s}^{-1} \text{GV}^{-1}$ , 1 GV = 500 kg) für 1984 (kalt, blau) und 2015 (warm, rot). Die Referenzwerte für  $\text{NH}_3$ - und Geruchsemissionsfaktoren sind  $e_{\text{NH}_3,0} = 3,64 \text{ kg a}^{-1}$  und  $e_{\text{OD},0} = 50 \text{ ou s}^{-1} \text{GV}^{-1}$ , die durch eine dünne schwarze Linie dargestellt werden. Die beiden Linien für 1984 und 2015 repräsentieren tägliche Durchschnittswerte der Geruchsstoff- und  $\text{NH}_3$ -Emissionen (aus: Schaubberger et al., 2018).

### Literatur:

- BLANES-VIDAL, V., NADIMI E.S., ELLERMANN T., ANDERSEN, H.V., LOFSTROM P., 2012. Perceived annoyance from environmental odors and association with atmospheric ammonia levels in non-urban residential communities: A cross-sectional study. *Environ. Health Global Access Sci. Sour.* **11**.
- MIKOVITS C., ZOLLITSCH W., HÖRTENHUBER, S.J., BAUMGARTNER, J., NIEBUHR, K., PIRINGER, M., ANDERS I., ANDRE K., HENNIG-PAUKA I., SSCHÖNHART, M., SCHAUBERGER G., 2019. Impacts of global warming on confined livestock systems for growing-fattening pigs: simulation of heat stress for 1981 to 2017 in Central Europe. *International Journal of Biometeorology* **63**, 221-230.
- SCHAUBERGER, G., HENNIG-PAUKA I., ZOLLITSCH W., HÖRTENHUBER S.J., BAUMGARTNER, J., NIEBUHR, K., PIRINGER, M., KNAUDER W., ANDERS, I., ANDRE, K., SCHÖNHART, M., 2020. Efficacy of adaptation measures to alleviate heat stress in confined livestock buildings in temperate climate zones. *Biosystems Engineering* **200**, 157-175.
- SCHAUBERGER, G., PIRINGER, M., MIKOVITS C., ZOLLITSCH W., HÖRTENHUBER, S.J., BAUMGARTNER, J., NIEBUHR, K., ANDERS, I., ANDRE, K., HENNIG-PAUKA I., SCHÖNHART, M., 2018. Impact of global warming on the odour and ammonia emissions of livestock buildings used for fattening pigs *Biosystems Engineering* **175**, 106-114.
- SCHAUBERGER, G., PIRINGER, M., PETZ, E., 1999. Diurnal and annual variation of odour emission from animal houses: A model calculation for fattening pigs. *Journal of Agricultural and Engineering Research* **74**, 251-259.
- SCHAUBERGER, G., PIRINGER, M., PETZ, E., 2000. Steady-state balance model to calculate the indoor climate of livestock buildings, demonstrated for fattening pigs. *International Journal of Biometeorology* **43**, 154-162.
- SCHAUBERGER, G., PIRINGER, M., PETZ, E., 2001. Separation distance to avoid odour nuisance due to livestock calculated by the Austrian odour dispersion model (AODM). *Agriculture, Ecosystems and Environment* **87**, 13-28.
- SCHAUBERGER, G., SCHÖNHART, M., ZOLLITSCH W., HÖRTENHUBER, S.J., KIRNER, L., MIKOVITS C., BAUMGARTNER, J., PIRINGER, M., KNAUDER, W., ANDERS, I., ANDRE, K., HENNIG-PAUKA I., 2021. Economic risk assessment by weather-related heat stress indices for confined livestock buildings: A case study for fattening pigs in Central Europe. *Agriculture* **11**, 122.
- SCHAUBERGER, G., SCHÖNHART, M., ZOLLITSCH W., HÖRTENHUBER, S.J., KIRNER, L., MIKOVITS C., BAUMGARTNER, J., PIRINGER, M., KNAUDER, W., ANDERS, I., ANDRE, K., HENNIG-PAUKA I., 2022. Reduction of the economic risk by adaptation measures to alleviate heat stress in confined buildings for growing-fattening pigs modelled by a projection for central europe in 2030. *Agronomy* **12**, 248.
- WYER K.E., KELLEGHAN, D.B., BLANES-VIDAL, V., SCHAUBERGER, G., CURRAN, T.P., 2022. Ammonia emissions from agriculture and their contribution to fine particulate matter: A review of implications for human health. *Journal of Environmental Management* **323**, 116285.

**Schlüsselwörter:** Tierhaltung, Schwein, Geflügel, Hitzestress, Adaptationsmaßnahmen, Emissionen, Klimawandel

## Das (neue) interimistische Bodenfeuchtemessnetz des Deutschen Wetterdienstes

*Falk Böttcher*

Deutscher Wetterdienst, Abteilung Agrarmeteorologie, Beratungsstelle Leipzig (Deutschland)

Die Bodenfeuchte ist eine der wichtigsten agrarmeteorologischen Größen, denn sie beschreibt das Vorhandensein des Wassers im Boden als Baustoff für die Pflanzen und als Transportmedium zur Versorgung der Pflanzen mit Nährstoffen und zur Verteilung von systemischen Pflanzenschutzmitteln sowie zur thermischen Klimatisierung und Ertragsbildung der Pflanzenbestände. Nicht erst in den letzten Jahren steigt der Bedarf an Bodenfeuchteinformationen und inzwischen sind einige internetbasierte Informationsservices verfügbar, um Nutzerinnen und Nutzern zielgerichtete Bodenfeuchteinformationen zur Verfügung stellen zu können. Neben dem UFZ-Dürremonitor stellt der Deutsche Wetterdienst (DWD) flächendeckend modellbasierte und kulturspezifische Informationen über den frei verfügbaren Bodenfeuchteviewer [www.dwd.de/bodenfeuchteviewer](http://www.dwd.de/bodenfeuchteviewer) oder die landwirtschaftsorientierte Plattform ISABEL (InformationSystem zur Agrarmeteorologischen Beratung für die Länder), die derzeit noch in Form einer geschlossenen Benutzergruppe angeboten wird, zur Verfügung. Für Anwendungen im Forstbereich gibt es in einigen Bundesländern einschlägige Angebote.

All diesen Services ist gemeinsam, dass sie zwar flächendeckende modellbasierte Informationen in unterschiedlichen räumlichen oder standörtlichen Skalen bieten, es aber in vielen Regionen an kontinuierlich durchgeführten und langjährigen Messungen des Bodenwassergehaltes mangelt. Es gibt zwar bei den Bundesländern und an Universitäten und Forschungseinrichtungen hier und da aktuelle und manchmal auch längerfristig zurückreichende Bodenfeuchtemessergebnisse, die zum Teil auch aus Netzwerken stammen, aber sowohl die methodischen Unterschiede als auch die Unterschiede im Zeittakt der Wertegewinnung und -verfügbarkeit schränken die zeitnahe Nutzung solcher Messergebnisse ein. Während für Bündelung und gemeinsame Datenhaltung von Bodenfeuchtwerten das bei der Bundesanstalt für Gewässerkunde angesiedelte International Soil Moisture Monitoring Network (ISMN; <https://ismn.bafg.de/en/>) verantwortlich ist, reiften beim DWD Überlegungen, mit einem homogen ausgestatteten und betriebenen Messnetz, das mindestens 20 Standorte in ganz Deutschland umfasst, auf den Messwertebedarf zu reagieren.

Die Planung des DWD-Bodenfeuchtemessnetzes an Standorten von DWD-Wetterstationen offenbarte jedoch, dass dessen Umsetzung einige Zeit benötigt. Um zügig Messwerte bereitstellen zu können, ergab sich nach Abschluss eines agrarmeteorologischen Drittmittelprojektes zur Düngungsoptimierung (StaPrax-Regio) die Möglichkeit, die im Projekt eingesetzte Bodenfeuchtemesstechnik mit vertretbarem Aufwand an die ausgewählten DWD-Standorte umzusetzen und bis zur Realisierung des eigentlichen Messnetzes ab 2024 Bodenfeuchtemesswerte im Stundentakt und in einer 10-cm-Auflösung bis 90 cm Tiefe für die unterschiedlichen Bedarfe innerhalb aber auch außerhalb des DWD verfügbar zu machen.

Die Sonden arbeiten nach dem FDR-Prinzip und werden dabei in den standardisierten Klimamessfeldern des DWD unter Gras eingebaut. Sie liefern neben der Angabe der volumetrischen Bodenfeuchte auch in gleicher räumlich und zeitlicher Auflösung Werte der Bodentemperatur, in Ergänzung zur standardisierten Bodentemperatur, die unter einer bewuchsfreien Bodenoberfläche gemessen wird.

Von den in Abbildung 1 gezeigten DWD-Stationen werden für das Bodenfeuchtemessnetz die Standorte Elpersbüttel, Friesoythe-Altenoythe, Soltau, Göttingen, Putbus, Boltenhagen, Kyritz, Bad Marienberg, Hoyerswerda, Bamberg, Weihenstephan-Dürnast, Wunsiedel-Schönbrunn, Rheinstetten, Stötten, Leutkirch-Herlazhofen, Chieming, Tholey, Ahaus, Zinnwald und Harzgerode genutzt. Zusätzlich stehen die Standorte Braunschweig, Schleiz und Leipzig-Holzhausen zur Verfügung.

Messnetzkarte DWD - Hauptamtliches Stationsnetz, GeoinfoDBw und Aerologie  
 Karte vom: 04.01.2023, 12:07 mit 207 Stationen

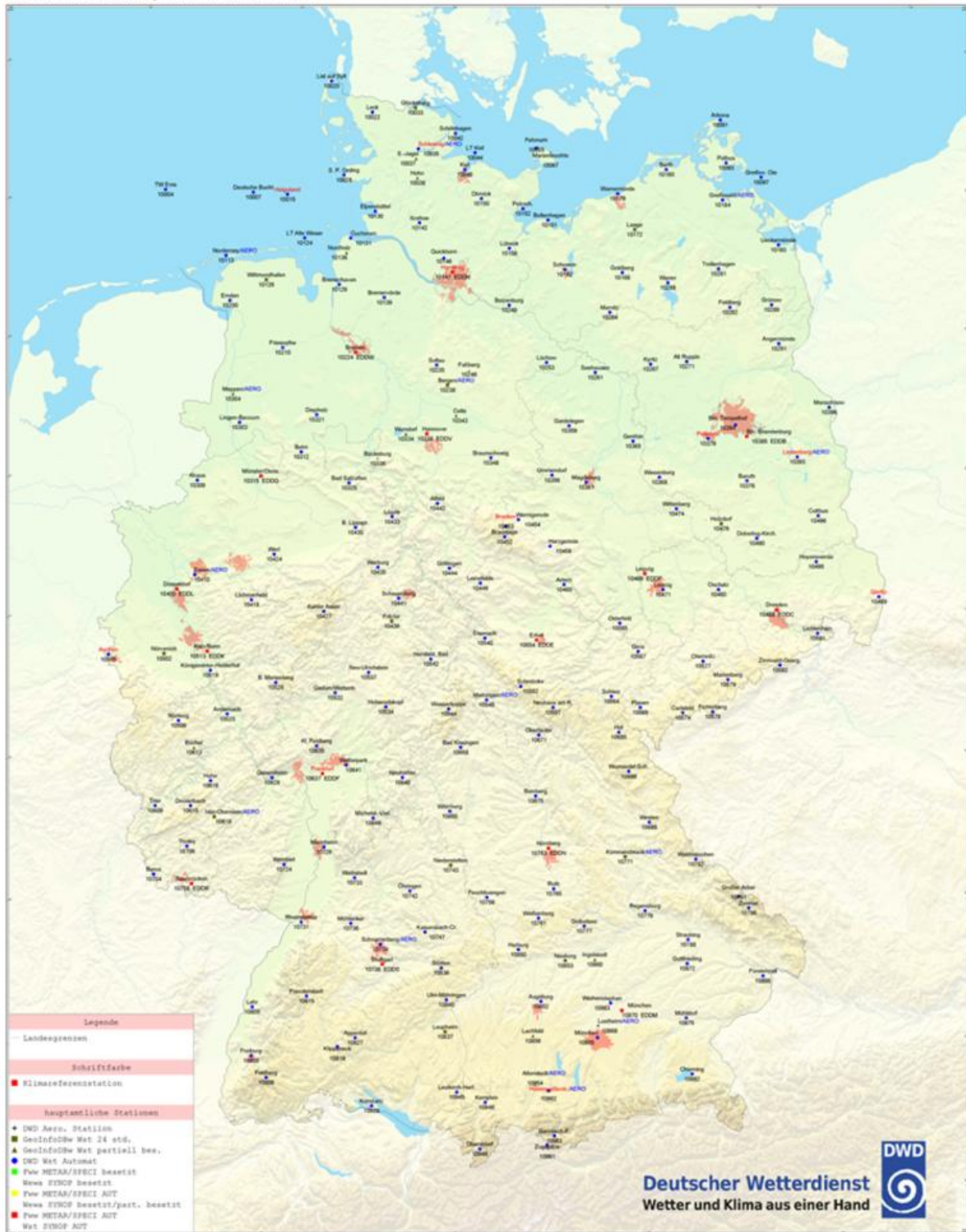


Abb. 1: Messnetzkarte des hauptamtlichen DWD-Wetterstationsnetzes. Siehe auch [www.dwd.de/DE/derdwd/messnetz/bodenbeobachtung/messnetzkarte\\_boden.pdf](http://www.dwd.de/DE/derdwd/messnetz/bodenbeobachtung/messnetzkarte_boden.pdf)

Zur Messung der Bodenfeuchte und der Bodentemperatur werden Sonden der Firma SENTEK verwendet. Es handelt es sich um das Modell Drill & Drop 90 cm moisture PLUS. Die konische Sonde wird in ein passgenaues Loch gebohrt. Das Bodengefüge wird dabei nicht verändert. Die Sonde misst die Bodentemperatur mit einem Pt100-Sensor in 10 cm Abständen bis in 90 cm Tiefe in einem Radius

von 5 – 10 cm um die Sonde herum. Das Pt100 ist ein Widerstandsthermometer, dessen Nennwiderstand bei 0°C 100 Ohm beträgt und bei steigender Temperatur ebenfalls ansteigt. Die Bodenfeuchtemessmethodik basiert auf der Tatsache, dass die Dielektrizitätszahl von Wasser bedeutend höher ist als die des Mineralbodens. Beim FDR-Verfahren (Frequency Domain Reflectometry) wird in der Frequenzdomäne gemessen, was gegenüber der TDR (Time Domain Reflectometry) eine einfachere Auswertelektronik erlaubt. Die Sonde im DWD-Messfeld in Weihenstephan-Dürnast ist in Abbildung 2 dargestellt.



Abb. 2: FDR-Bodenfeuchte- und Bodentemperatursonde (im Vordergrund) an der DWD-Wetterstation in Weihenstephan-Dürnast.

Zur Qualitätssicherung der Messwerte der FDR-Sonden werden an den 20 Standorten gelegentlich vergleichende Messungen der Bodenfeuchte aus Bohrstockproben vorgenommen. Die dabei festgestellten Differenzen zwischen den FDR-Werten und den Bohrstockmesswerten dienen bei Notwendigkeit der Korrektur des Messniveaus der FDR-Sonden. Abbildung 3 zeigt exemplarisch für zwei Standorte die Ergebnisse der Vergleichsmessungen.

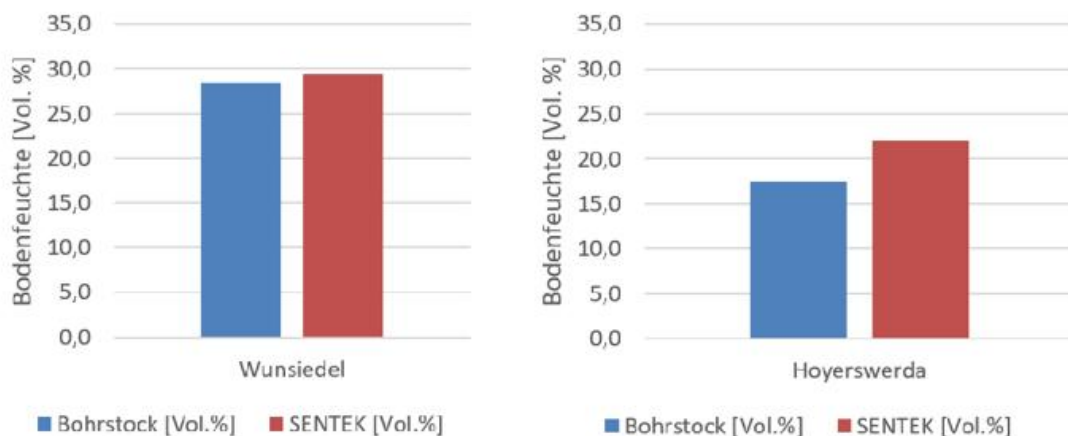


Abb. 3: Ergebnis des Vergleichs der Bodenfeuchtemessungen in Vol.% in Wunsiedel am 17.10.2023 und Hoyerswerda am 10.11.2023.

In derzeit beim DWD laufenden Tests werden auch weitere Messgeräte zur Bodenfeuchtebestimmung untersucht. Es handelt sich hierbei unter anderem um CRNS-Anlagen. CRNS bedeutet Cosmic Ray Neutron Sensing. CRNS erfasst die mittlere Bodenfeuchte innerhalb eines Radius von über 100 Metern um eine Sonde und bis zu einer Tiefe von mehreren Dezimetern. Zur Messung wird die „Abbremsung“ kosmisch eingestrahelter Neutronen durch Kollision mit den im Bodenwasser enthaltenen Wasserstoffkernen verwendet. Eine solche Anlage ist in Abbildung 4 dargestellt.



Abb. 4: DWD-CRNS-Sonde am Standort der vom Freistaat Sachsen (Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft) betriebenen Lysimeterstation Brandis.

## Wie Klimavorhersagen der Bodenfeuchte der Land- und Forstwirtschaft nutzen können

Thomas Leppelt, Andreas Paxian, Sabrina Wehring

Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main (Deutschland)

Die Folgen der Erderwärmung werden in Europa immer deutlicher erkennbar. Beispielsweise konnten die aufeinanderfolgenden trockenen und heißen Jahre von 2018 bis 2020 als herausragendes Ereignis mit bisher nicht aufgetretener Intensität klassifiziert werden (Rakovec et al., 2022). Durch die voranschreitenden Klimaveränderungen ist mit einer erhöhten Wahrscheinlichkeit von solchen langen und mehrjährigen Trockenheitsperioden in Zentraleuropa zu rechnen. Hari et al. (2020) haben dafür verschiedene Klimaszenarien auf das Auftreten von mehrjährigen Dürreperioden untersucht und konnten zeigen, dass solche Ereignisse in der nahen (2006-2050) und fernen (2051-2100) Zukunft in Szenarien mit geringem Klimaschutz 4 bis 8 mal häufiger auftreten könnten. Im Vergleich dazu erhöhte sich die Wahrscheinlichkeit im Szenario mit umfassenden Klimaschutzmaßnahmen nur geringfügig.

Mehrjährige und großflächige Dürreereignisse können zu erheblichen, negativen Auswirkungen auf die Land- und Forstwirtschaft führen. Durch die Dürre von 2018-2020 in Zentraleuropa erlitt die Landwirtschaft erhebliche Ertragseinbußen und Grünfutterknappheit, während die Forstwirtschaft mit einer starken Borkenkäferausbreitung, Trockenschäden und Waldbränden zu kämpfen hatte. Durch die geringen Niederschläge stellte sich kurz darauf auch eine Bodentrockenheit ein, die über mehrere Jahre anhielt. In Abbildung 1 ist diese negative Bodenfeuchteanomalie für die mittlere Bodenfeuchte im Sommer in Deutschland dargestellt. Die drei trockenen Jahre von 2018 bis 2020 sind dort sehr gut zu sehen. Eine Attributionsstudie des Teams der World Weather Attribution (2022) hat darüber hinaus die Auswirkungen der Trockenperiode in Zentral- bzw. Westeuropa im Jahr 2022 auf die Bodenfeuchte im Wurzelraum untersucht. Sie kam zu dem Schluss, dass die Wahrscheinlichkeit einer solchen außergewöhnlichen Bodentrockenheit bereits jetzt schon durch den menschengemachten Klimawandel 20-mal höher ist und im derzeitigen Klima alle zwanzig Jahre auftritt.

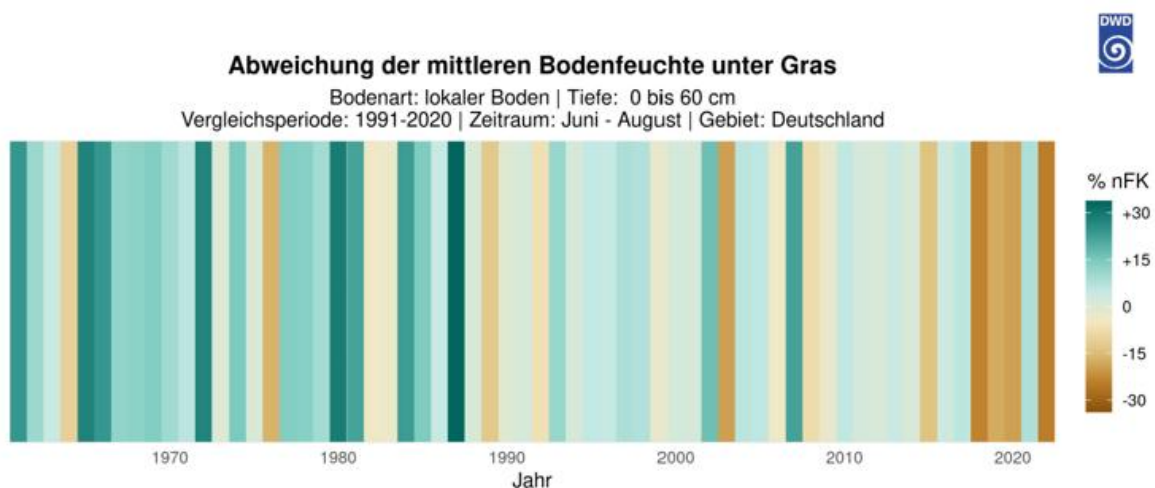


Abb. 1: Abweichung der mittleren Bodenfeuchte unter Gras in den Sommermonaten (Juni bis August) für den Oberboden von 0 bis 60 cm in% der nutzbaren Feldkapazität für Deutschland.

Um die Auswirkungen dieser Bodentrockenheit auf die Landwirtschaft zu begrenzen, wären langfristige Vorhersagen über mehrere Wochen oder sogar Monate hilfreich. Wenn mehrwöchige Dürreperioden frühzeitig erkannt werden, können Vorbereitungen getroffen werden und somit die Auswirkungen von solchen Trockenperioden reduziert und Ressourcen geschont werden. Da insbesondere langfristige Klimavorhersagen über mehrere Wochen, Monate und Jahre mit ansteigenden Unsicherheiten verbunden sind, ist es wichtig, eine Größe zu finden, die eine möglichst hohe Vorhersagegüte aufweist und gleichzeitig relevante Informationen für die Einschätzung des Wasserhaushalts bzw. der Wasserversorgung der Kulturpflanzen in der Land- und Forstwirtschaft liefert. Die hier vorgestellten Klimavorhersagen für die Bodenfeuchte zeigen großes Potential um beide Aspekte zu erfüllen.

Die Vorgehensweise ist in Abbildung 2 dargestellt. Als Grundlage werden zwei Vorhersageensemblesysteme genutzt. Für die Witterungsvorhersage bis zu 6 Wochen wird das IFS-Extended-Range-Ensemble vom europäischen Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage (EZMWF) eingesetzt, während für die Jahreszeitenvorhersage von bis zu sechs Monaten das Vorhersageensemble des German Climate Forecast System (GCFS) vom Deutschen Wetterdienst (DWD) verwendet wird. Auf beide Modellensembles wird im ersten Schritt das statistische Downscaling-Verfahren EPISODES angewandt (Kreienkamp et al., 2019), um einen Bias-korrigierten 5 km Datensatz zu erhalten. Diese korrigierten Ensembledatensätze werden im Anschluss für die hydrologische Modellierung der Bodenfeuchte verwendet. Für die Wirkmodellierung von Agrarökosystemen wird das Modell AMBAV genutzt (Löpmeier, 1983), während Waldökosysteme mit dem Modell LWF-Brook90 simuliert werden (Paul Schmidt-Walter et al., 2020). Zum Abschluss werden für die Bodenfeuchtevorhersagen der Modellensembles noch der mittlere quadratische Fehler gegenüber der Klimatologie als Referenzvorhersage (MSESS) und der Anomaliekorrelationskoeffizient (ACC) als Gütemaß berechnet, um die Qualität der Vorhersage einschätzen zu können.



Abb. 2: Ablaufschema der Bodenfeuchteklimavorhersagen.

Die Ergebnisse der Vorhersagegüte sind beispielhaft für die Witterungsvorhersagen vom Mai 2021 bis Juli 2022 in Abbildung 3 dargestellt. Es wird ersichtlich, dass die Persistenz der Bodenfeuchte zu einer besseren Vorhersagbarkeit im Vergleich gegenüber der anderen relevanten Größe, dem Niederschlag führt. Der MSESS für die Bodenfeuchte liegt in fast allen Monaten für Vorhersagezeiten von bis zu 4 Wochen deutlich über 0 und ist damit besser als die Referenzvorhersage mit der Klimatologie, während die Vorhersagegüte des Niederschlags bereits nach einer Woche deutlich unter 0 absinkt.

Die Analyse zeigt, dass das pflanzenverfügbare Wasser im Boden nicht nur eine wichtige Größe ist, um die Wasserverfügbarkeit für Kulturarten abschätzen zu können, sondern auch eine hohe Vorhersagequalität über mehrere Wochen aufweist. Diese Vorlaufzeit von mehreren Wochen kann genutzt werden, um Managementmaßnahmen anzupassen, oder bestimmte Vorgehensweisen, wie z.B. eine späte Qualitätsdüngung im Getreideanbau bei vorhergesagten trockenen Bedingungen, wegzulassen und Ressourcen einzusparen. Auch in der Forstwirtschaft, können Regionen, die vorrausichtlich von Bodentrockenheit betroffen sein werden, frühzeitig intensiver auf Borkenkäferbefall kontrolliert und ggf. geplante Pflanzungen verschoben werden. Dadurch würden die jungen Bäume nicht direkt durch die vorhergesagte Trockenheit absterben.

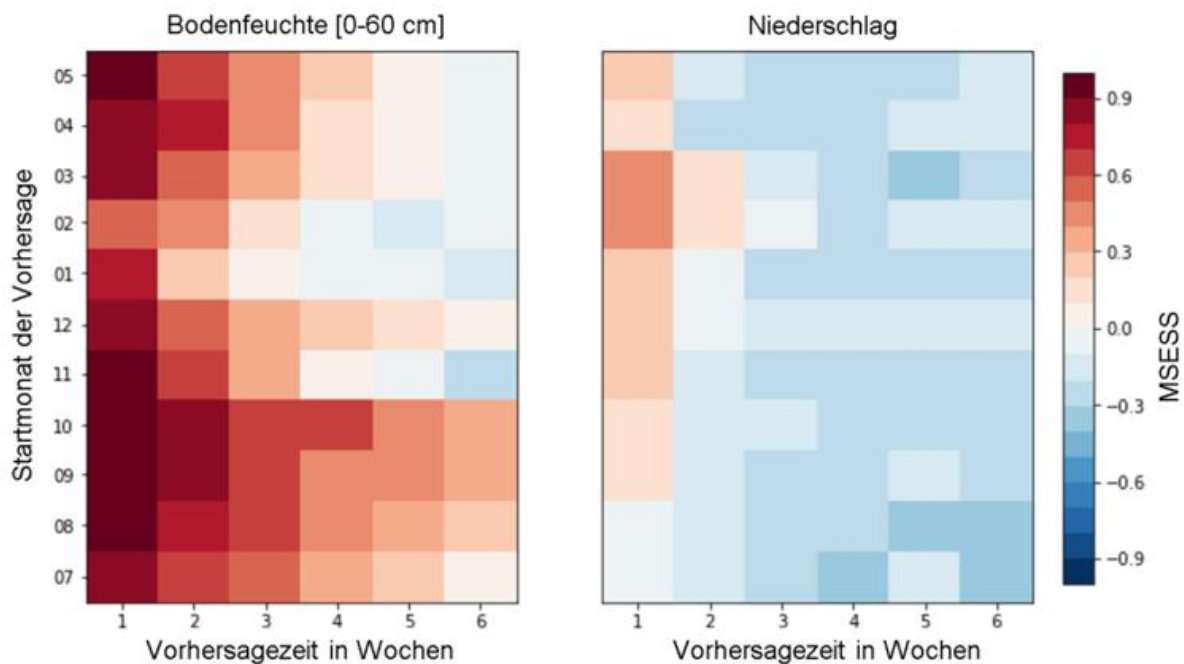


Abb. 3: Mittlere Vorhersagequalität für die Witterungsvorhersagen vom Mai 2021 bis zum Juli 2022 als mittlerer quadratischer Fehler gegenüber der Klimatologie als Referenzvorhersage. Links für die Bodenfeuchte im Oberboden (0 bis 60 cm) und rechts für die Niederschlagssumme. Aggregiert nach Startmonaten der Witterungsvorhersagen für Deutschland.

Weitere Auswertungen der Jahreszeitemvorhersagen zeigen, dass die Bodenfeuchtevorhersagen bis zu einer Vorhersagezeit von bis zu zwei Monaten eine hohe Qualität aufweisen. Darüber hinaus nehmen die Unsicherheiten stark zu. Nichtsdestotrotz können die Bodenfeuchteklimavorhersager über mehrere Wochen als Dürreindikator sinnvoll genutzt werden. Insbesondere bei der zukünftigen Anpassung der Land- und Forstwirtschaft an den Klimawandel können diese Klimavorhersagen einen wichtigen Baustein darstellen.

#### Literatur:

- Rakovec, O., Samaniego, L., Hari, V., Markonis, Y., Moravec, V., Thober, S., et al. (2022). The 2018–2020 multi-year drought sets a new benchmark in Europe. *Earth's Future*, 10, e2021EF002394. <https://doi.org/10.1029/2021EF002394>
- Hari, V., Rakovec, O., Markonis, Y. et al. Increased future occurrences of the exceptional 2018–2019 Central European drought under global warming. *Sci Rep* 10, 12207 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68872-9>
- World Weather Attribution (2022). High temperatures exacerbated by climate change made 2022 Northern Hemisphere droughts more likely. <https://www.worldweatherattribution.org/wp-content/uploads/WCE-NH-drought-scientific-report.pdf>
- Kreienkamp, F., Paxian, A., Früh, B. et al. Evaluation of the empirical–statistical downscaling method EPISODES. *Clim Dyn* 52, 991–1026 (2019). <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4276-2>
- Löpmeier, F. J. (1983). *Agrarmeteorologisches Modell zur Berechnung der aktuellen Verdunstung (AMBAV)* (p. 55). Braunschweig, Germany: Dt. Wetterdienst, Zentrale Agrarmeteorologische Forschungsstelle Braunschweig.
- Paul Schmidt-Walter, Volodymyr Trotsiuk, Katrin Meusburger, Martina Zacios, Henning Meesenburg. Advancing simulations of water fluxes, soil moisture and drought stress by using the LWF-Brook90 hydrological model in R, *Agricultural and Forest Meteorology*, Volume 291, 2020, 108023, ISSN 0168-1923, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108023>.

**Schlüsselwörter:** Bodenfeuchte, Witterungsvorhersage, Jahreszeitemvorhersage, Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Dürre, Bodentrockenheit

## 2.2 Poster

### The Agricultural Risk Information System (ARIS) for Austrian agriculture

*Sabina Thaler<sup>1,2</sup>, Josef Eitzinger<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Institute of Meteorology and Climatology, Department of Water, Atmosphere and Environment, University of Natural Resources and Life Sciences, Gregor-Mendel-Straße 33, 1180 Vienna (Austria)

<sup>2</sup>CzechGlobe – Global Change Research Institute CAS, Belidla 986, 4a, 603 00 Brno (Czech Republic)

Weather-related cropping risks can vary widely in their nature and seasonal frequency. They include weather phenomena that directly and indirectly affect crop growing conditions as well as yield and damage potential. Examples are drought and heat impacts (that directly limit assimilation or yield formation process), overwintering conditions of winter crops (especially severe temperature fluctuations and snow cover conditions), frost risks at various phenological stages, risks to seeding and germination (soil erosion risk, inadequate soil wetness and temperatures), adverse weather conditions causing yield loss such as wet periods, strong winds (through lodging, N leaching, erosion), high humidity and leaf wetness (forcing fungal diseases), high temperatures (forcing insect pests) and others.

In this context, ARIS (Agricultural Risk Information System), a GIS-based monitoring system (applicable for past- now- and forecasting as well as climate scenarios) was developed for a number of weather-related abiotic and biotic cropping risks, crop management and growing conditions. ARIS indicators can be applied for various time periods on a daily base and a spatial grid of 1 km for weather/climate conditions (0.5 km for soil conditions based on the available Austrian soil map). The currently implemented indicators for general cropping conditions or risks are based on daily weather variables, partly combined with soil wetness, regardless other potential (not weather related) limitations. Crop specific risk indicators are based on algorithms for phenological development of currently 5 main crops and include especially the soil-crop water balance as well as combined drought and heat stress effects. Biotic indicators include pests and diseases of importance for Austrian conditions.

### 3 Phänologie – Indikator des Klimawandels

#### 3.1 Vorträge

„ ... jene Herren Beobachter, welche hierzu Lust und Musse haben ... “ - Phänologie und Citizen Science in Österreich seit 1851

*Helfried Scheifinger<sup>1</sup>, Christa Hammerl<sup>1</sup>, Thomas Hübner<sup>1</sup>, Elisabeth Koch<sup>2</sup>, Hans Ressler<sup>1</sup>, Markus Ungersböck<sup>1</sup>, Philipp Hummer<sup>3</sup>, Klaus Wanninger<sup>4</sup>*

<sup>1</sup>GeoSphere Austria, Hohe Warte 38, 1190 Wien (Österreich)

<sup>2</sup>Fasangasse 4, 2283 Obersiebenbrunn (Österreich)

<sup>3</sup>SPOTTERON Citizen Science App Plattform, Faßziehergasse 5, 1070 Wien (Österreich)

<sup>4</sup>LACON Landschaftsplanung Consulting, Hasnerstraße 123/Top 3.2.2, 1160 Wien (Österreich)

Die heutige Existenz der Phänologie an der GeoSphere Austria kann als Ergebnis einer greifbaren geschichtlichen Entwicklung, aus dem Zusammenspiel sehr unterschiedlicher und kontingenter Elemente verstanden werden. Personen, Institutionen, technische Gegebenheiten, Offenheit für Wissenschaft in der gebildeten Bevölkerung, fügten sich um die Mitte des 19. Jahrhunderts derart, dass das erste längerfristige und koordinierte phänologische Beobachtungsnetz in Österreich eingerichtet und betrieben werden konnte. Der Einstieg erfolgte mit der Gründung der Centralanstalt für Meteorologie und Erdmagnetismus 1851. Karl Fritsch (1812–1879), Adjunkt und später Vizedirektor der ZAMG, schuf das erste meteorologische und phänologische Beobachtungsnetz der Monarchie, verfasste und verbesserte die Beobachtungsanleitungen und betreute die Beobachter. Das Beobachtungsnetz wurde nach seinem Tod im Jahr 1879 aufgelassen. Erst 50 Jahre später wurden wieder phänologische Beobachtungsnetze in Österreich unter Einbeziehung von Schulen eingerichtet. Die meisten Daten aus dieser Zeit sind kriegsbedingt verloren gegangen. Unter Maria Roller (1916–1986) und Friedrich Rosenkranz (1900–1957) erfolgte die Gründung des aktuellen und heute noch aktiven phänologischen Beobachtungsnetzes nach dem Krieg ab 1946. In diese Periode fällt auch die höchste Stationsdichte von knapp 500 Stationen. Die geschichtliche Beschreibung schließt mit der aktuellen Phase seit 1987 und den seitdem erfolgten massiven technischen Neuerungen.

Die Meteorologie und die Phänologie waren vor allem in der Anfangszeit auf die Mitarbeit von Freiwilligen angewiesen. Daran hat sich für die Phänologie bis heute nichts geändert. Die Anwerbung, Motivation und Ausbildung der freiwilligen Beobachter stellt die wichtigste Aufgabe beim Betrieb phänologischer Beobachtungsnetze dar. Technische Errungenschaften unterstützten die phänologische Beobachtungspraxis und Forschung. Die Problematik des menschengemachten Klimawandels motivierte „data rescue“-Projekte, die darauf abzielten, phänologische Informationen aus Archiven der Wissenschaft zugänglich zu machen. Die Phänologie konnte sich in ihrer vielleicht wichtigsten Funktion für die Gesellschaft, nämlich als Indikator für den Klimawandel, etablieren. Nachdem ein Fortschreiten der Temperaturerhöhung zu erwarten ist, bleibt auch die Bedeutung der Phänologie als Indikator für den Klimawandel erhalten.

## Grafische Darstellung phänologischer Information für Zwecke der Qualitätskontrolle, Citizen Science Beteiligung und Medienarbeit

*Helfried Scheifinger, Hans Ressler, Thomas Hübner*

GeoSphere Austria, Hohe Warte 38, 1190 Wien (Österreich)

Elektronische Medien ermöglichen den freiwilligen Beobachtern von phänologischen Beobachtungsnetzwerken die unmittelbare Eingabe und Übermittlung ihrer Augenbeobachtungen. Selbst die sogenannten Schnellmeldenetze hinken hinter den Echtzeitmöglichkeiten der aktuellen Medien her. Damit kann das aktuelle phänologische Geschehen unmittelbar mitverfolgt, grafisch umgesetzt und über die langen Beobachtungsreihen mit der Vergangenheit in Beziehung gesetzt werden.

Einige Betreiber phänologischer Netzwerke bieten auf ihren Webseiten Visualisierungen ihrer phänologischen Beobachtungen, wie z.B. das NPN der USA (<https://www.usanpn.org/home>) oder der DWD ([https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaueberwachung/phaenologie/produkte/produkte\\_node.html;jsessionid=BB9EF99761C056E62CEA7F364EB3E870.live31091](https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaueberwachung/phaenologie/produkte/produkte_node.html;jsessionid=BB9EF99761C056E62CEA7F364EB3E870.live31091)).

Aus Sicht eines Netzwerkbetreibers bestehen eine Reihe von guten Gründen, sich mit den aktuellsten phänologischen Meldungen auseinanderzusetzen:

- Das Monitoring der Beteiligung der freiwilligen Beobachter. Meldequoten demonstrieren den Jahresgang der phänologischen Meldungen (mit einem Frühjahrs- und Herbstmaximum) der freiwilligen Beobachter, die Wirkung von Medienaussendungen und letztlich über mehrere Jahre hinweg den Trend der Beobachtungszahlen.
- Qualitätskontrolle der Meldungen. Vor allem Smart Phone Apps ermöglichen Rückmeldungen auf Beobachtungen und die direkte Kontaktaufnahme mit den Beobachtern. Nachdem viele phänologische Phasen eine ausgeprägte Höhenabhängigkeit aufweisen, liefern Streuplots Hinweise auf problematische Beobachtungen.
- Phänologische Echtzeitmeldungen bilden die Grundlage für die monatlichen Phänologieberichte während der phänologisch aktiven Zeit des Jahres, die Variabilität des Witterungsablaufs spiegelt sich mit einiger Verzögerung in der phänologischen Entwicklung.
- Die aktuelle phänologische Entwicklung diverser Obstblüten liefert in Kombination mit zu erwartenden Tagesminimumtemperaturen Hinweise auf ein mögliches Spätfrostisiko. Die Erfassung der aktuellen phänologischen Entwicklung ermöglicht die Flexibilisierung der Schnittzeitpunkte für Naturschutzflächen und Biodiversitätsflächen.  
<https://naturschutzmonitoring.at/de/news/vorverlegungskarte-2023/>
- Zuletzt gehört das Monitoring phänologischer Trends zu den spannendsten Themen im Rahmen der Wirkung des Klimas auf Ökosysteme. Wie fügen sich die aktuellen Eintrittszeiten in den langjährigen Verlauf an, bleiben die Trends bestehen? Das ist eines der wichtigen Argumente für den kontinuierlichen Betrieb phänologischer Beobachtungsnetze durch Wetterdienste.

Das phänologische Team der GeoSphere Austria schuf für die oben genannten Zwecke während der letzten Jahre eine Reihe von grafischen Darstellungen, die hier präsentiert werden, unter anderem den Phänospiegel, diverse Zeitreihendarstellungen und Varianten der phänologischen Uhr.

## Das Netzwerk der Internationalen Phänologischen Gärten Europas – ein Update

*Susanne Jochner-Oette, Johanna Jetschni*

Katholische Universität Eichstätt-Ingolstadt, Professur für Physische Geographie / Landschaftsökologie und nachhaltige Ökosystementwicklung (Deutschland)

Die Pflanzenphänologie stellt einen wichtigen Indikator für die Reaktion der Natur auf veränderte Umweltbedingungen dar. Es besteht ein starker statistischer Zusammenhang zwischen den Eintrittsterminen phänologischer Phasen und der Temperatur am jeweiligen Standort. Abweichungen von dieser Korrelation werden häufig durch intraspezifische genetische Variationen erklärt.

Um diesen Einfluss auszuschließen, haben Fritz Schnelle und Erik Volkert das Netzwerk der Internationalen Phänologischen Gärten Europas (IPG) gegründet. Dieses Netzwerk stellt eine einzigartige Datenbasis bereit, die von Forschenden für verschiedene Studien weltweit verwendet wird. In diesen Gärten werden Bäume und Sträucher gepflanzt, die vegetativ in einem Muttergarten vermehrt wurden. Bisher wurden über 120.000 phänologische Beobachtungen von 23 Arten gesammelt und derzeit tragen mehr als 60 aktive IPG zu dieser Datenbank bei.

In diesem Vortrag werden die Geschichte, Ziele und Potenziale des IPG-Netzwerks dargestellt. Da die wissenschaftliche Koordination des Netzwerks kürzlich von der Humboldt-Universität zu Berlin (F.-M. Chmielewski) auf die Katholische Universität Eichstätt-Ingolstadt übertragen wurde, stellen wir auch die neue Webseite und Datenbank zur Erfassung phänologischer Daten vor.

## Kooperation mit Naturparken und Klimawandelanpassungsregionen für die Erhebung phänologischer Daten in Österreich

*Thomas Hübner<sup>1</sup>, Klaus Wanninger<sup>2</sup>, Hans Ressler<sup>1</sup>, Helfried Scheifinger<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>GeoSphere Austria, Hohe Warte 38, 1190 Wien (Österreich)

<sup>2</sup>LACON, Ransmayr, Vondruska & Wanninger OG - Technisches Büro für Landschaftsplanung – Consulting, Hasnerstraße 123/Top 3.2.2, A-1160 Wien (Österreich)

Phänologische Beobachtungen sind für die Klimawandeldokumentation und Klimawandelkommunikation von großer Bedeutung, da in ihnen die kleinräumigen Verhältnisse der atmosphärischen Prozesse integriert abgebildet werden.

Eine möglichst dichte und einheitliche Aufnahme der phänologischen Entwicklung ist somit ein Grundpfeiler für die Klimawandelanpassung gerade in Bezug auf Pflanzen, Ökosysteme, Forst- und Landwirtschaft. Damit das funktioniert, bedarf es einer fundierten einheitlichen Ausbildung der Beobachter, solider Werkzeuge für die Datenerhebung, eine möglichst hohe Dichte von Beobachtern in den Regionen und motivierter Multiplikatoren, die das Thema auch aus Eigeninteresse hochhalten.

Die GeoSphere Austria, deren Phänologische Vergangenheit bis zu deren Gründung im Jahr 1851 zurückreicht, hat in den letzten Jahren erhebliche Modernisierungen im Beobachtungssystem vorgenommen und die Rolle des Citizen Scientists in der Zusammenarbeit stärker in den Fokus gerückt. Dabei wurden die Erhebungswerkzeuge dem Stand der Zeit angepasst, es gibt seit einigen Jahren eine Smartphone App, Material für die Ausbildung von Phänologieexperten wurde definiert und Ausbildungskurse wurden durchgeführt. Naturparke in verschiedenen Bundesländern Österreichs sowie die Klimawandelanpassungsregionen (KLAR!), die aus dem Umwelt- und Energiefonds gefördert werden, wurden als Partner gewonnen und es wurde damit begonnen Multiplikatoren in den Regionen auszubilden. An vielen Standorten wurden sogenannte Klimahecken gepflanzt und mit entsprechenden Informationstafeln zur Phänologie und mit einer Beobachtungsanleitung versehen, damit Bürgerinnen und Bürger zu Citizen Scientists werden und ihre eigenen Kompetenz in Fragen Klimawandel entsprechen erweitern, aber auch einbringen können.

## Physiologisch basierte Modellierung der Obstblüte am Beispiel der Süßkirsche

*F.-M. Chmielewski, Klaus-Peter Götz*

Humboldt-Universität zu Berlin, Lebenswissenschaftliche Fakultät, Institut für Agrar- und Gartenbauwissenschaften, Professur für Agrarklimatologie (Deutschland)

### Einleitung

Die Vorhersage des Blühbeginns von Obstgehölzen unter sich ändernden Klimabedingungen ist in vielerlei Hinsicht von Bedeutung. Die hierzu verwendeten phänologischen Modelle sollten weitgehend physiologisch fundiert sein, um Fehlaussagen zu vermeiden. Bereits Lang et al. (1987) unterteilten die Winterruhe der Gehölze in die Phasen der Endo- und Ökodormanz. Leider wird die Ökodormanz in phänologischen Modellen bis heute kaum berücksichtigt, da sich die Termine für das Ende der Endodormanz ( $t_1$ ) und den Beginn der ontogenetischen Entwicklung ( $t_1^*$ ) der direkten Beobachtung entziehen. Beide Zeitpunkte müssen experimentell bestimmt werden. Statistische Verfahren zur Bestimmung von  $t_1$  und  $t_1^*$  stellen hierbei keine Alternative dar.

### Material und Methode

Es werden drei phänologische Modellansätze (M1-M3) für den Blühbeginn der Süßkirschsorte „Summit“ (Chmielewski und Götz, 2023) untersucht. M1 und M2 sind sogenannte 2-Phasen-Modelle, die in der ersten Phase die Akkumulation von Kälteeinheiten zur Überwindung der Endodormanz in „chill portions“ (CP) und in der zweiten Phase den bis zum Blühbeginn erforderlichen Wärmereiz in „growing degree hours“ (GDH) berechnen. Die Ökodormanz wird in beiden Modellen nicht berücksichtigt.

Für die Optimierung von M1 bzw. zur Berechnung der Modellparameter von M2 und M3 standen Beobachtungswerte zum Blühbeginn von „Summit“ (2011/12-2019/20) sowie experimentelle und analytische Daten zur Bestimmung von  $t_1$  und  $t_1^*$  und zum Abscisinsäure (ABA)-Gehalt in den Blütenknospen zur Verfügung. Zur Validierung der Modelle wurden die Jahre 2020/21-2022/23 verwendet. Die erhobenen Daten stammen von einer Süßkirsch-Versuchsplantage in Berlin-Dahlem (52.47° N, 13.30° E, h=51 m), in der 80 Bäume der Sorten „Summit“, „Karina“ und „Regina“ im Zeitraum 1999-2023 gepflanzt waren. Die meteorologischen Daten wurden in unmittelbarer Nähe der Plantage erhoben. Die mittlere Lufttemperatur am Standort beträgt 10,4 °C, bei einer Niederschlagshöhe von 562 mm (Referenzperiode 1991-2020). Der Boden ist eine Braunerde-Fahlerde (*Albic Luvisol*).

Der Abscisinsäure-Gehalt in den „Summit“-Knospen wurde von Metabolon Inc., 617 Davis Drive, Morrisville, NC 27560 ([www.metabolon.com](http://www.metabolon.com)) analysiert. Zur Bewertung der Modellgüte wurde die Wurzel aus der mittleren Summe der Fehlerquadrate (RMSE) verwendet.

M1 ist ein in der Phänologie weit verbreiteter statistischen Modellansatz, bei dem der Kälte- ( $C^*$ ) und Wärmebedarf ( $F^*$ ) der Knospe bis zum Blühbeginn (BB) ausschließlich an phänologischen Beobachtungen optimiert wird (inverse Modellierung). Die tatsächliche Dauer der Entwicklungsphasen ist unbekannt und ergibt sich aus der Modelloptimierung (Abb. 1).



Abb. 1: Klassisches 2-Phasen Modell (M1) zur Berechnung des Blühbeginns (BB, BBCH 60) der Süßkirsche unter Optimierung des Kälte- ( $C^*$ ) und Wärmebedarfs ( $F^*$ ) bis zum Blühbeginn.

Im Gegensatz dazu wurden in M2 die zur Überwindung der Endodormanz ( $t_1$ ) notwendigen Kälteeinheiten ( $C^*$ ) unter kontrollierten Bedingungen in einer Klimakammer (12 h Licht,  $t=20\text{ °C}/15\text{ °C}$  Tag/Nacht, 70 % rel. Luftfeuchte) ermittelt, so dass der anschließend notwendige Wärmebedarf ( $F^*$ ) bis zum Blühbeginn ab  $t_1$  berechnet werden konnte (Abb. 2).

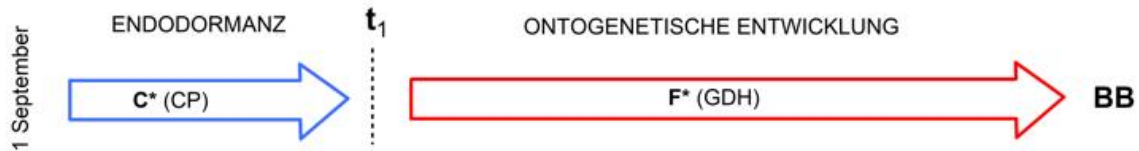


Abb. 2: Verbessertes 2-Phasen Modell (M2) zur Berechnung des Blühbeginns (BB, BBCH 60) der Süßkirsche, wobei  $t_1$  experimentell bestimmt wurde, so dass sich  $C^*$  und  $F^*$  innerhalb der Phasen berechnen lässt.

M3 verwendet zusätzlich den aus Untersuchungen zum Wassergehalt in den Blütenknospen abgeleiteten Zeitpunkt des Beginns der ontogenetischen Entwicklung ( $t_1^*$ ), so dass in diesem 3-Phasen-Modell die Ökodormanz ( $t_1-t_1^*$ ) als eigene Phase modelliert werden konnte (Abb. 3). Der Wassergehalt in den Knospen, der während der Ökodormanz konstant bei 54 % liegt, steigt ab  $t_1^*$  bis zum Blühbeginn kontinuierlich auf ca. 80 % an. Dies ist ein Indiz für die Wiederaufnahme der biologischen Aktivität in den Blütenknospen und beginnt je nach Witterung ca. 2-4 Wochen vor den ersten sichtbaren Veränderungen an der Knospe (Entwicklungsstadium „swollen bud“, BBCH 51).



Abb. 3: Physiologisch basiertes 3-Phasen Modell (M3) zur Berechnung des Blühbeginns (BB, BBCH 60) der Süßkirsche, wobei  $t_1$  und  $t_1^*$  und der ABA-Gehalt in den Knospen analytisch ermittelt wurden, so dass alle 3 Modellparameter ( $C^*$ ,  $F^*_w$ ,  $F^*$ ) innerhalb der entsprechenden Phasen berechnet werden konnten.

Zusätzlich wurde in M3 der ABA-Gehalt in der Knospe berücksichtigt, der während der Ökodormanz nachweislich eine entwicklungshemmende Wirkung hat (Pan et al., 2021; Chmielewski und Götz, 2022), so dass die in dieser Phase stündlich akkumulierte Wärme ( $F_j$ ) entsprechend dem täglichen ABA-Gehalt in der Knospe (relative Einheiten,  $ABA_{rel}$ ) gewichtet werden konnte.  $F_w$  ist die im jeweiligen Jahr akkumulierte Wärme zwischen  $t_1$  und  $t_1^*$  (Gleichung 1).

$$F_w = \sum_{i=t_1}^{t_1^*} \sum_{j=1}^{24} F_j \cdot [1 - ABA_{rel_i}] \text{ in } GDH_w; \text{ mit } ABA_{rel_i} = \frac{ABA_i}{ABA(t_1)}, t_1 \leq i < t_1^* \quad (1)$$

Der mittlere Wärmebedarf der Knospe während der Ökodormanz  $F^*_w(t_1-t_1^*)$  wurde als arithmetisches Mittel über  $n=9$  Versuchsjahre berechnet (Gleichung 2).

$$F^*_w = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n F_{w_k} \text{ in } GDH_w, n = 9 \quad (2)$$

Der Gesamtwärmebedarf bis zum Blühbeginn  $F^*(t_1-BB)$  ergibt sich somit aus der Summe der während der Ökodormanz  $F^*_w(t_1-t_1^*)$  und der ontogenetischen Entwicklung  $F^*(t_1^*-BB)$  akkumulierten Wärme (Gleichung 3). Letztere wurde wieder in konventionellen GDH berechnet.

$$F^*(t_1 - BB) = F^*_w(t_1 - t_1^*) + F^*(t_1^* - BB) \text{ in GDH}^* \quad (3)$$

## Ergebnisse

Das Modell **M1** passt die phänologischen Daten mit einem akzeptablen Fehler von  $RMSE=2,6$  Tage für die Optimierungsperiode und  $RMSE=4,2$  Tage für die Validierungsperiode an (Tab. 1). Aus physiologischer Sicht ist das Modell jedoch nicht akzeptabel, da der zur Überwindung der Endodormanz erforderliche Kältereiz ( $C^*$ ) um mehr als 50 % überschätzt wurde (92 CP vs. 42 CP). Als mittlerer Zeitpunkt für  $t_1$  ergibt sich somit der 16. Februar (47 DOY), der in etwa dem mittleren Beginn der ontogenetischen Entwicklung ( $t_1^*=52$  DOY, 21. Februar) und nicht dem mittleren Zeitpunkt für  $t_1$  (1. Dezember, 335 DOY) entspricht.

Tab. 1: Optimierter (M1) und experimentell ermittelter (M2, M3) Kältebedarf ( $C^*$ ) zur Überwindung der Endodormanz in „chill portions“ (CP), mittlerer Zeitpunkt für das Ende der Endodormanz ( $t_1$ ) in Tagen nach Jahresbeginn (DOY), experimentell bestimmter mittlerer Beginn der ontogenetischen Entwicklung ( $t_1^*$ ).  $F^*(t_1-BB)$ : erforderliche Wärme von „Summit“ zwischen  $t_1$  und dem Blühbeginn (BB) in „growing degree hours“ (GHD/GDH\*), cv: Variationskoeffizient von  $F^*(t_1-BB)$ , RMSE: Wurzel aus der mittleren Summe der Fehlerquadrate für den Zeitraum der Modellerstellung 2011/12-2019/20 und Modellvalidierung (RMSEval) 2020/21-2022/23 in Tagen (d).

Modell	$C^*$	$t_1$	$t_1^*$	$F^*(t_1-BB)^{1)}$	cv	RMSE	RMSE <sub>val</sub>
	in CP	in DOY	in DOY	in GDH/GDH*	in %	in d	in d
M1	92	47 (16.02.)	–	3514	11.3	2,62	4,24
M2	42	335 (01.12.)	–	4471	16.0	5,23	5,48
M3	42	335 (01.12.)	52 (21.02.)	3679	8.9	2,29	0,82

<sup>1)</sup> M1, M2 in GDH; M3 in GDH\*

Modell **M2** zeigt mit  $cv=16.0$  % die höchste jährliche Variabilität der akkumulierten Wärme ( $F^*$ ) zwischen  $t_1$  und BB, die sortenspezifisch ist und ab  $t_1$  (335 DOY) für jedes Jahr nahezu konstant sein sollte. Dies ist jedoch bei M2 nicht der Fall, obwohl der genaue Zeitpunkt für das Ende der Endodormanz ( $t_1$ ) im Modell berücksichtigt wird. Dies spiegelt sich in dem hohen Fehler von  $RMSE=5,2$  Tage für die Jahre der Modellentwicklung und  $RMSE=5,5$  Tage für die Modellvalidierung wider. Die Ursache hierfür konnte durch einen Vergleich der akkumulierten Wärme während der Ökodormanz ( $t_1-t_1^*$ ) von M2 und M3 erklärt werden (Chmielewski und Götz, 2023). Es zeigte sich, dass in M2 vor allem in milden Wintern (z.B. 2015/16, 2019/20) während der Ökodormanz viel Wärme akkumuliert wurde (2460, 1900 GDH), die eigentlich nicht entwicklungsfördernd war. Das Modell prognostizierte daher den Blühbeginn in den Jahren 2016 und 2020 um 11 Tage bzw. 7 Tage zu früh. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in dieser Phase der ABA-Gehalt in der Knospe nur langsam abnimmt und somit die verfügbare Wärme erst allmählich die Knospenentwicklung fördert.

Im Modell **M3** wurde das Problem der übermäßigen Wärmeakkumulation während der Ökodormanz gelöst, indem der ABA-Gehalt in den Blütenknospen bei der Berechnung der GHD berücksichtigt wurde (Gl. 1). Hierdurch wurde die in dieser Phase verfügbare Wärme im Mittel um fast 80 % reduziert, so dass in M3 nur ca. 20 % der während der Ökodormanz verfügbaren Wärme für die Knospenentwicklung berücksichtigt wurde. Dies reduzierte die jährliche Variabilität der bis zum Blühbeginn benötigten

Gesamtwärme  $F^*(t_1-BB)$  auf  $cv=8,9\%$ . Dies zeigt, dass die Blütenknospen bereits zu diesem Zeitpunkt auf Wärme reagieren, insbesondere wenn der ABA-Gehalt gesunken ist. Damit weist M3 den geringsten Fehler der drei Modellansätze auf (RMSE=2,3d für die Modellentwicklung, RMSE<1d für die Modellvalidierung).

### Schlussfolgerungen

Dieses Ergebnis belegt die Überlegenheit des physiologisch basierten Modellansatzes M3 gegenüber dem ausschließlich an Beobachtungsdaten optimierten Modell M1. Auch die Kenntnis von  $t_1$  im Modell M2 führte zu keiner Verbesserung des Modells. Dies zeigt, dass die Kenntnis von  $t_1$  allein für einen physiologischen Modellansatz nicht ausreicht. Dazu muss neben  $t_1$  auch  $t_1^*$  bekannt sein, wodurch die Ökodormanz terminiert werden kann. Damit war es möglich die entwicklungshemmende Wirkung des ABA-Gehalts in den Knospen in das Modell zu integrieren.

Die Untersuchungen haben auch gezeigt, dass Modelle wie M1, die ausschließlich auf der Basis phänologischer Beobachtungen optimiert werden, nicht geeignet sind, um Verschiebungen des Blühbeginns von Kirschen aufgrund des Klimawandels vorherzusagen. Die starke Überschätzung des Kältereizes ( $C^*$ ) in M1 kann dazu führen, dass die Anbauwürdigkeit der untersuchten Sorte in Frage gestellt wird, wenn unter wärmeren klimatischen Bedingungen der angenommene Kältereiz nicht mehr erfüllt wird. Aus diesem Grund sind rein statistische Ansätze weder für die zeitliche Bestimmung des Auftretens der Dormanzphasen noch zur Ableitung des für die Knospenentwicklung erforderlichen Kälte- und Wärmereizes ( $C^*$ ,  $F^*$ ) geeignet.

### Literatur:

CHMIELEWSKI, F.-M., GÖTZ, K.-P.: Towards a physiological modeling of sweet cherry blossom. *Horticulturae* 2023, **9**, 1207.

CHMIELEWSKI, F.-M., GÖTZ, K.-P.: ABA and not chilling reduces heat requirement to force cherry blossom after endodormancy release. *Plants* 2022, **11**, 2044.

LANG, G.A., EARLY, J.D., MARTIN, G.C., DARNELL, R.L.: Endodormancy, paradormancy, and ecodormancy - Physiological terminology and classification for dormancy research. *Hortscience* 1987, **22**, 371-377.

PAN, W., LIANG, J., SUI, J., LI, J., LIU, C., YIN X. et al.: ABA and bud dormancy in perennials: current knowledge and future perspective. *Genes* 2021, **12**, 1635.

**Schlüsselwörter:** *Prunus avium* L., Süßkirsche, „Summit“, phänologische Modellierung, Endodormanz, Ökodormanz, ontogenetische Entwicklung, Abscisinsäure (ABA)

## Die Bewertung des Allergierisikos städtischer Parks mittels Phänologie und Aerobiologie

*Johanna Jetschni, Annika Rippert, Susanne Jochner-Oette*

Physische Geographie/Landschaftsökologie und nachhaltige Ökosystementwicklung, Kath. Universität Eichstätt-Ingolstadt (Deutschland)

Daten zum Pollenflug an einem bestimmten Ort eignen sich, um das Allergierisiko für Personen abzuschätzen, die gegen bestimmte Pollenarten allergisch sind. Die Erhebung dieser Daten ist jedoch zeit- und kostenintensiv. Daher soll in dieser Studie das Allergierisiko aus verschiedenen Blickwinkeln unter Einbeziehung von phänologischen und aerobiologischen Daten am Beispiel der Birke erfasst und verglichen werden.

Die Studie wurde in dem 2.2 ha großen städtischen Park "Hofgarten" in Eichstätt durchgeführt, in dem 231 Bäume stehen, darunter zwei Birken (*Betula pendula* Roth). Zur Bewertung der Phänologie fand die Aufnahme der Blühstadien der Birken von 2017 bis 2020 mithilfe des BBCH-Codes statt. Zudem wurden für den gleichen Zeitraum Daten zum Birkenpollenflug mit volumetrischen und gravimetrischen Pollenfalle aufgezeichnet. Um Informationen über die Pollenbelastung an verschiedenen Standorten im Park zu erhalten, wurden für die Dauer einer Saison Pollenmessungen in Atemhöhe (ca. 1.5 m über dem Boden) durchgeführt. Die zweistündlichen Werte wurden verwendet, um ihre Eignung für die Vorhersage der täglichen Pollenbelastung zu beurteilen. Die ermittelten Kennwerte der Aerobiologie (u.a. Start, Ende, Dauer, Intensität der *Betula* Pollensaison) wurden mit phänologischen Daten verglichen.

Unsere phänologischen Daten zeigen, dass der Beginn der Birkenblüte von Jahr zu Jahr variiert (zwischen dem 6. April und dem 19. April). In allen Jahren war der Beginn der aerobiologischen Pollensaison früher zu verzeichnen als der lokale Blühbeginn im Hofgarten (mittlere Differenz 7,5 Tage). Die geringste zeitliche Differenz wurde im Jahr 2020 beobachtet, als die Pollensaison sechs Tage früher begann. Die Intensität der Birkenpollensaison konnte anhand des aus aerobiologischen Daten abgeleiteten saisonalen Pollenintegrals (SPIn) angegeben werden. Die intensivste Pollensaison wurde im Jahr 2018 verzeichnet (SPIn = 9.053 Pollen\*Tag/m<sup>3</sup>). Zudem war eine große Variation zwischen den Pollenkonzentrationen, die in 10 m Höhe und in Atemhöhe gemessen wurde, zu beobachten.

Aerobiologische Daten liefern eine detaillierte Beschreibung des Allergierisikos, da sie die tatsächliche Exposition berücksichtigen. Weitere Studien sollten jedoch Symptomdaten einbeziehen, um hierdurch die Auswirkungen der Pollenbelastung auf den Menschen zu ermitteln.

## Fernerkundungsbasierte phänologische Trendschätzungen werden durch heterogene Landschaftsstrukturen beeinflusst - eine theoretische Simulationsanalyse

*Daniel Doktor*<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung - UFZ, Department Fernerkundung, Leipzig (Deutschland)

<sup>2</sup>Remote Sensing Centre for Earth System Research - RSC4Earth, Leipzig (Deutschland)

<sup>3</sup>German Center for Integrative Biodiversity Research - iDiv Halle-Jena-Leipzig (Deutschland)

Verschiedene Studien haben die Reaktion der Vegetation auf veränderte Temperaturmuster bewertet, indem sie phänologische Kennzahlen aus Satellitenbeobachtungen extrahierten. Während Bewertungen auf Grundlage von Bodenbeobachtungen einen einheitlichen Trend zu einem früheren Beginn der Vegetationsperiode bei allen Arten zeigen, zeigen entsprechende Studien, die auf fernerkundlichen Bildern basieren, ein vielfältigeres Bild. Bei Durchschnittsbetrachtungen auf kontinentalen Maßstab wurden größtenteils negative Trends (Richtung eines früheren Beginns) identifiziert, jedoch variierten die Trendstärken erheblich. Auf der Ebene der Landbedeckung wurden sowohl negative als auch positive Trends auf vergleichsweise kleinen räumlichen Skalen gefunden. Wir vermuten, dass diese scheinbaren Trendunterschiede zwischen Landbedeckungstypen auf Mischpixel-Effekte zurückzuführen sind, die sich je nach verwendeter Methode auf extrahierte phänologische Kennzahlen unterschiedlich auswirken. Diese Effekte treten stärker auf, wenn grob aufgelöste Satellitenbilder (> 250 m oder 1 km) verwendet werden, bei denen eine Mischung unterschiedlicher Ergrünungssignale von verschiedenen Landbedeckungstypen häufig sind.

Daher analysierte diese Arbeit, wie sich eine Mischung simulierter Ergrünungssignale aus verschiedenen Landnutzungstypen auf phänologische Kennzahlen auswirkt, wie sie von gebräuchlichen Methoden abgeleitet werden. Systematisch unterschiedliche Kennzahlen zwischen den Methoden würden folglich auch die entsprechenden Trendabschätzungen beeinflussen. Die simulierten Ergrünungssignale wurden mit einem bekannten Trend zu einem früheren Ergrünungsbeginn (1d/y) implementiert. Diese Simulationen wurden mithilfe des Strahlungstransfermodells PROSAIL für vier Landbedeckungstypen mit variierenden räumlichen Anteilen innerhalb eines Satellitenpixels durchgeführt. Die am häufigsten verwendeten Methoden zur Extraktion phänologischer Metriken, wie zum Beispiel logistische oder sigmoidale Funktionen, wurden auf die simulierte saisonale NDVI-Entwicklung angewendet.

Das implementierte Rahmenwerk ermöglicht die Bewertung der Robustheit von abgeleiteten Ergrünungstrends in heterogenen Landschaften auf theoretischer Basis. Ergebnisse aus simulierten Satellitendaten deuten darauf hin, dass sich unterschiedliche Trendabschätzungen für viele Landschaften aus gemischten Ergrünungssignalen ergeben, d. h. aus zwei oder mehr Landnutzungstypen innerhalb eines Pixels, und sogar in homogenen Landbedeckungen auftreten. Abgeleitete Trends weichen insbesondere im Fall von gemischten Signalen erheblich vom implementierten Trend ab. Wir fanden Unterschiede von mehr als 1 Tag pro Jahr zwischen simulierten und extrahierten Trends. Folglich sollten Trendabschätzungen auf Grundlage von Satellitenbeobachtungen im Zusammenhang mit zugrunde liegenden Landnutzungs- / Landbedeckungsänderungen betrachtet werden.

## Pflanze KlimaKultur! –

### Einfluss des Stadtklimas auf die Phänologie von Pflanzen - ein Citizen Science-Ansatz

*Birgit Nordt<sup>1</sup>, Wayne Schmitt<sup>1</sup>, Rolf A. Engelmann<sup>2</sup>, Isabell Hensen<sup>3,4</sup>, Hannah Prawitz<sup>3,5,6</sup>, Robert Rauschkolb<sup>3,7</sup>, Christine Römermann<sup>3,7</sup>, Sabrina Träger<sup>3,4</sup>, Aletta Bonn<sup>3,5,6</sup>, Gerald Parolly<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Botanischer Garten und Botanisches Museum, Freie Universität Berlin (Deutschland)

<sup>2</sup>Botanischer Garten der Universität Leipzig (Deutschland)

<sup>3</sup>Deutsches Zentrum für integrative Biodiversitätsforschung (iDiv) Halle-Jena-Leipzig (Deutschland)

<sup>4</sup>Institutsbereich Geobotanik und Botanischer Garten, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg (Deutschland)

<sup>5</sup>Department Ökosystemleistungen, Helmholtz Zentrum für Umweltforschung (UFZ), Leipzig (Deutschland)

<sup>6</sup>Institut für Biodiversität, Friedrich Schiller University Jena (Deutschland)

<sup>7</sup>Institut für Ökologie und Evolution mit Herbarium Haussknecht und Botanischem Garten, Friedrich Schiller University Jena (Deutschland)

Spiegeln sich innerstädtische Klimagradienten in der Phänologie von krautigen Pflanzen wider? Diese Zusammenhänge und daran anknüpfende Fragestellungen untersucht das von Teams in Berlin, Halle, Jena und Leipzig koordinierte, BMBF-geförderte Citizen Science-Projekt *Pflanze KlimaKultur!* ([www.pflanzeklimakultur.de](http://www.pflanzeklimakultur.de)) von 2022 bis 2024 am Beispiel von elf krautigen Pflanzenarten zusammen mit ca. 200 Bürgerwissenschaftlerinnen und Bürgerwissenschaftlern. Angesichts der zunehmend trockeneren und wärmeren Sommer in Ostdeutschland wurden heimische oder eingebürgerte Arten ausgewählt, die an solche Bedingungen relativ gut angepasst sind und über deren Phänologie bereits in den vergangenen Jahren erste Daten in den beteiligten Botanischen Gärten gesammelt worden sind (*Althaea officinalis*, *Clematis recta*, *Eranthis hyemalis*, *Filipendula vulgaris*, *Malva sylvestris*, *Salvia nemorosa*, *Saponaria officinalis*, *Scabiosa canescens*, *Securigera varia*, *Solidago virgaurea*, *Tulipa sylvestris*). Obwohl krautige Pflanzen in vielen Lebensräumen dominieren und einen wesentlichen Bestandteil der heimischen Flora stellen, ist ihre Phänologie weniger gut untersucht als die der Gehölze.

Alle beteiligten Citizen Scientists haben 2022 in Privat-, Schul-, Gemeinschaftsgärten oder auf öffentlichen Flächen Beete mit diesen Arten angelegt und beobachten zwei Jahre lang die Phänologie auf der Basis eines vereinfachten PhenObs-Protokolls (Nordt et al., 2021). Klimalogger liefern die entsprechenden Temperatur- (Luft- in 10 cm Höhe, Oberflächen- und Bodentemperatur in 10 cm Tiefe) sowie Bodenfeuchtedaten. Alle Mitmachenden nehmen die phänologischen Daten wöchentlich auf und übermitteln diese via Webinterface oder verwenden ein speziell dafür erstelltes Feature der FloraIncognita-App (Mäder et al., 2021).

Die ersten Analysen konzentrieren sich auf einzelne Arten. *Tulipa sylvestris*, ein Frühjahrsblüher mit auch für Laien gut einschätzbaren phänologischen Stadien, bietet sich als Beispiel an. Zunächst wurden die phänologischen Daten mit aus Satellitenaufnahmen erstellten Landnutzungsprofilen (© mundialis GmbH) kombiniert, um die Effekte von Bebauungsgrad, Grünflächen und sonstiger Landnutzung auf die Phänologie sichtbar zu machen (Christmann et al., 2023). Abbildung 1 zeigt eine solche Karte beispielhaft für Berlin und Umgebung mit den Daten für den Blühbeginn von *T. sylvestris* 2023.

Der Blühbeginn ist signifikant mit dem Grünflächenanteil (Wald oder Grasland) in 500 m Umkreis korreliert ( $R = 0,32$ ,  $p = 0,019$ ). Es gibt jedoch nur eine schwache Korrelation von Grünflächenanteil und Blühende ( $R = 0,13$ ,  $p = 0,33$ ) bzw. Blühdauer ( $R = -0,16$ ,  $p = 0,26$ ; Abb. 2).

Diese Zusammenhänge zeigen sich in Bezug auf die Lufttemperatur noch deutlicher (Abb. 3). Besonders Blühbeginn ( $R = -0,52$ ,  $p < 0,001$ ) und Blühende ( $R = -0,36$ ,  $p = 0,019$ ) von *T. sylvestris* zeigen eine signifikant negative Korrelation mit der mittleren Lufttemperatur im Januar. Bei den vegetativen Stadien ist lediglich die Seneszenz signifikant mit der Januartemperatur korreliert ( $R = 0,26$ ,  $p = 0,03$ ).

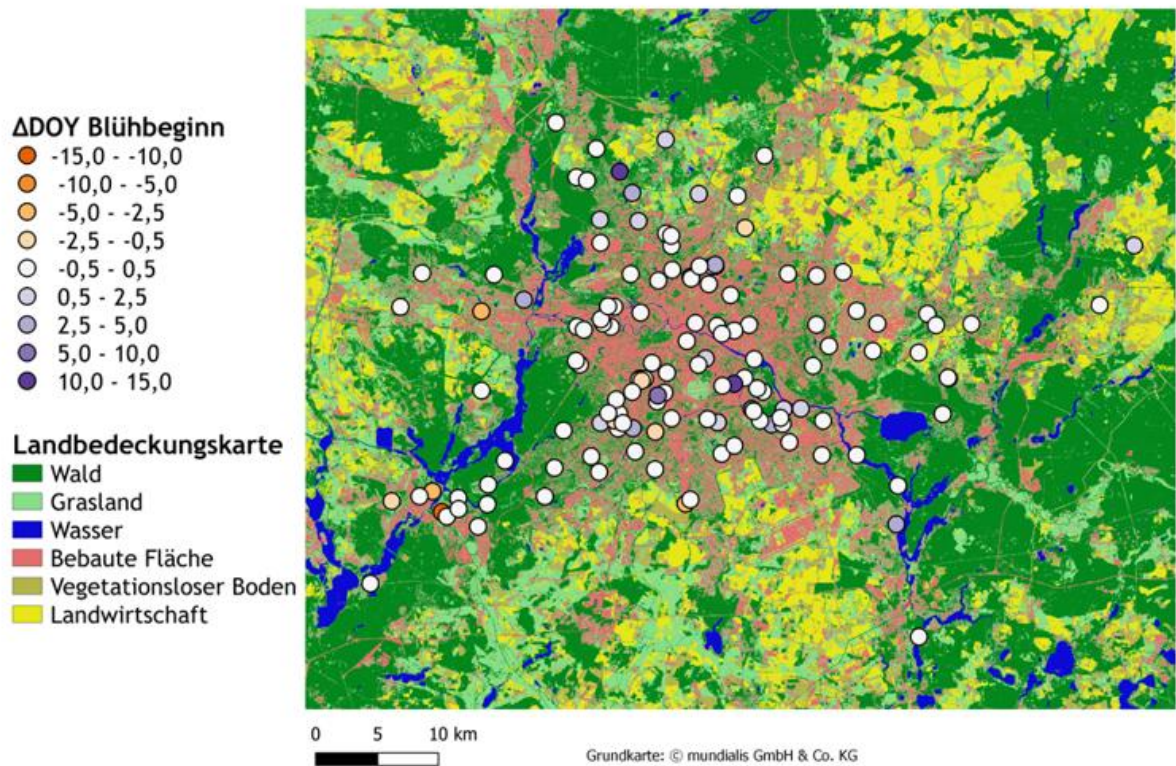


Abb. 1: Landnutzungskarte für Berlin und Umgebung mit den Daten für den Blühbeginn von *Tulipa sylvestris* auf den Versuchsbeeten 2023. Dargestellt ist die jeweilige Abweichung (in Tagen) vom mittleren Blühbeginn (DOY 110 = 20. April). DOY: Day of the Year.

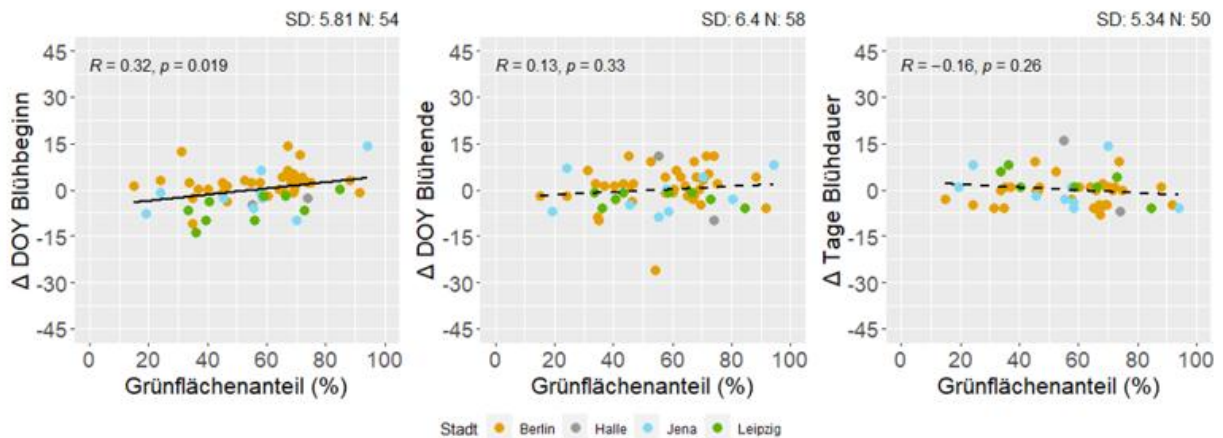


Abb. 2: Blühphänologie von *Tulipa sylvestris* in Korrelation zum Grünflächenanteil in der Umgebung (500 m Umkreis). Dargestellt ist die jeweilige Abweichung (in Tagen) vom Durchschnitt (Blühbeginn: DOY 110, Blühende: DOY 123, Blühdauer: 13 Tage).

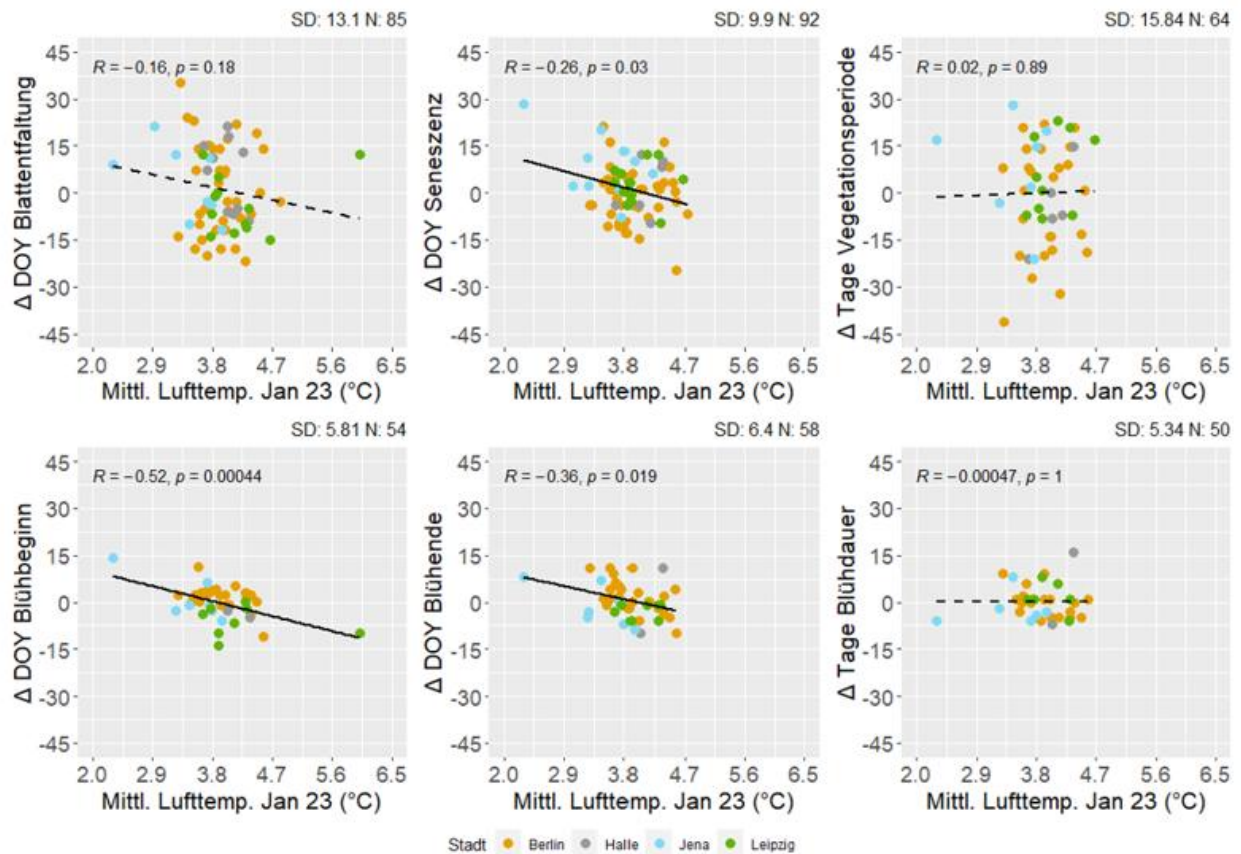


Abb. 3: Korrelation zwischen der mittleren Lufttemperatur (10 cm Höhe) im Januar 2023 und den phänologischen Stadien/ Phasen von *Tulipa sylvestris*, bezogen auf die Abweichung von den jeweiligen Durchschnittswerten: Blattentfaltung: DOY 21, Seneszenz: DOY 138, Vegetationsperiode: 119 Tage, Blühbeginn: DOY 110, Blühende: DOY 123, Blühdauer: 13 Tage.

Die hier vorgestellten Analysen sind aus 50 - 92 Teildatensätzen erstellt worden, da während des noch laufenden Projektes bisher nicht alle Klimalogger abgelesen werden konnten, die Datenübermittlung durch die Mitmachenden nicht vollständig und die Bereinigung der Rohdaten nicht abgeschlossen ist. Erste Berechnungen, die mehrere Arten einschließen, zeigen bereits, dass besonders die Zusammenhänge zwischen generativen Stadien und Grünflächenanteil bzw. Temperatur signifikant sind. Bei den vegetativen Stadien ist das weniger deutlich. Dies könnte aber auch mit der oft schwierigeren Einschätzung dieser Stadien durch die Mitmachenden zusammenhängen.

Der Grünflächenanteil in der Umgebung der Beete könnte als Indikator für die tatsächlich gemessenen Temperaturabweichungen von der städtischen Mitteltemperatur dienen. Dies kann eine Bewertung der phänologischen Daten auch dann ermöglichen, wenn keine Messdaten zur Temperatur in den betreffenden Beeten vorliegen.

Aus der Analyse der Gesamtdaten nach Abschluss des Projektes Ende 2024 erwarten wir einen vertieften Einblick in die komplexen Faktoren, die auf die Phänologie von Pflanzen an urbanen Standorten Einfluss nehmen. Durch die Auswertungen zu einzelnen Arten und Zeiträumen konnten bereits erste Tendenzen aufgezeigt werden, die aber nicht für alle Arten gleich sind. Dies betont die Bedeutung einer biodiversen Stadtnatur für die zukünftige Klimaresilienz der Siedlungsräume.

Ein genauso wichtiger Aspekt des Projektes *Pflanze KlimaKultur!* ist das Angebot von Dialog-Plattformen über die Botanischen Gärten, um gemeinsam mit Bürgerinnen und Bürger der beteiligten Städte – unter Einbindung von Vertreterinnen und Vertreter der Politik – Ideen und Visionen für biodiverse, gesunde und klimaresiliente Städte zu entwickeln (Primack & Rushing, 2009). Ein weiteres zentrales Projektziel ist es, damit Citizen Science als wichtigen sozio-kulturellen Aspekt für den Aufbau von

kommunalen Kapazitäten zu stärken, Bürgerinnen und Bürger stärker in die Entwicklung von Forschungsfragen einzubeziehen und dadurch „grüne Themen“ besser in der Gesellschaft zu verankern (Hecker et al., 2018).

**Literatur:**

CHRISTMANN, T., KOWARIK, I., BERNARD-VERDIER, M., BUCHHOLZ, S., HILLER, A., SEITZ, B. & LIPPE, M.V.D., 2023: Phenology of grassland plants responds to urbanization. *Urban Ecosystems* **26**(1), 261-275.

HECKER, S., HAKLAY, M., BOWSER, A., MAKUCH, Z., VOGEL, J. & BONN, A. (Eds.), 2018: Citizen Science: Innovation in Open Science, Society and Policy. *UCL Press*.

MÄDER, P., BOHO, D., RZANNY, M., SEELAND, M., WITTICH, H. C., DEGGELMANN, A. & WÄLDCHEN, J., 2021: The flora incognita app–interactive plant species identification. *Methods in Ecology and Evolution* **12**, 1335-1342.

NORDT, B., HENSEN, I., BUCHER, S.F., FREIBERG, M., PRIMACK, R.B., STEVENS, A.-D., BONN, A., WIRTH, C., JAKUBKA, D., PLOS, C., SPORBERT, M. & RÖMERMANN, C., 2021: The PhenObs initiative: A standardised protocol for monitoring phenological responses to climate change using herbaceous plant species in botanical gardens. *Functional Ecology* **35**, 821–834.

PRIMACK, R.B. & MILLER-RUSHING, A.J., 2009: The role of botanical gardens in climate change research. *New Phytologist* **182**, 303–313.

**Schlüsselwörter:** Phänologie, Biodiversität, Klimaresilienz, Landnutzung, Bürgerwissenschaften, Botanische Gärten

## Spatial variability in herbaceous plant phenology is mostly explained by variability in temperature but also by photoperiod and functional traits

*Robert Rauschkolb<sup>1,2</sup>, Solveig Franziska Bucher<sup>1,2</sup>, Christine Römermann<sup>1,2</sup> and the PhenObs network<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>German Centre for Integrative Biodiversity Research (iDiv) Halle-Jena-Leipzig, Leipzig (Germany)

<sup>2</sup>Institute of Ecology and Evolution with Herbarium Haussknecht and Botanical Garden, Friedrich Schiller University Jena, Jena (Germany)

<sup>3</sup>PhenObs Team: <https://www.idiv.de/de/web/phenobs/mitglieder.html>

Global climate change is not only characterised by changes in environmental parameters, such as rising temperatures, but also by an increasing variability of these parameters. This can consequently lead to a more variable occurrence of phenological events in plants which has been shown by Zhang et al. (2014). Whereas temporal variability of plant phenology in response to climate has already been well studied, the spatial variability of phenology is not well understood. As spatial variability in phenology may affect the magnitude of biotic interaction between plants (e.g., facilitation and competition), and between plants and animals (e.g., pollination and herbivory), it is important to develop a profound understanding of the drivers (Stemkovski et al., 2023).

In this study, we analysed phenology records of 148 herbaceous species, which were observed for a single year by the PhenObs network (<https://www.idiv.de/de/web/phenobs.html>) in 15 botanical gardens across the northern hemisphere (Nordt et al., 2021). For each species, we characterised the spatial variability in the six different phenological stages across gardens (two vegetative (leaf unfolding and onset of leaf senescence at the end of the growing season) and three reproductive (onset of flowering, peak flowering, and onset of fruiting) stages). We used boosted regression trees (BRTs) to link the variabilities in phenology to the variability in environmental parameters (temperature, latitude, and local habitat conditions) as well as species traits (seed mass, vegetative height, specific leaf area, and temporal niche). All included traits were hypothesised to be related to phenology variability (König et al., 2018). Traits were extracted from TRY (Kattge et al., 2020) and gaps within the data set filled with measurements conducted by PhenObs members. We calculated the species-specific trait “temporal niche” from the phenological data by calculating the mean of the day of first flowering across all gardens and years. With these analyses, we wanted to answer the following research question: 1) To what extent do herbaceous species observed in botanical gardens differ in their spatial variability in vegetative and reproductive phenology? 2) Which environmental factors and functional traits are the most important to predict spatial variability in the phenology of herbaceous species?

We found significant differences between the studied species in the spatial variability for all six phenological stages (p-values of Levene’s tests for all phenological stages <0.001), with onset of senescence and flowering duration showing the highest and onset of flowering and the peak flowering showing the lowest variability. Regarding the second research question our results showed strong positive associations between the variability in temperature ( $SD_{Temp}$ ) and the variability of all six phenological stages (Fig. 1). In contrast, the variability in latitude ( $SD_{Lat}$ ) was only important for explaining the variability in leaf unfolding, flowering onset and flowering peak. In all cases, the variability of these environmental factors showed a positive association with the variability in phenology (Fig. 1). The results of the BRTs further showed that less competitive species (small SLA and/or smaller plants) were more variable in leaf unfolding and flowering onset (Fig. 1a, c) compared to more competitive species. Early-flowering species showed a more variable timing for the display of first flowers, the peak flowering and the flowering duration compared to late-flowering species (Fig. 1c, d, e).

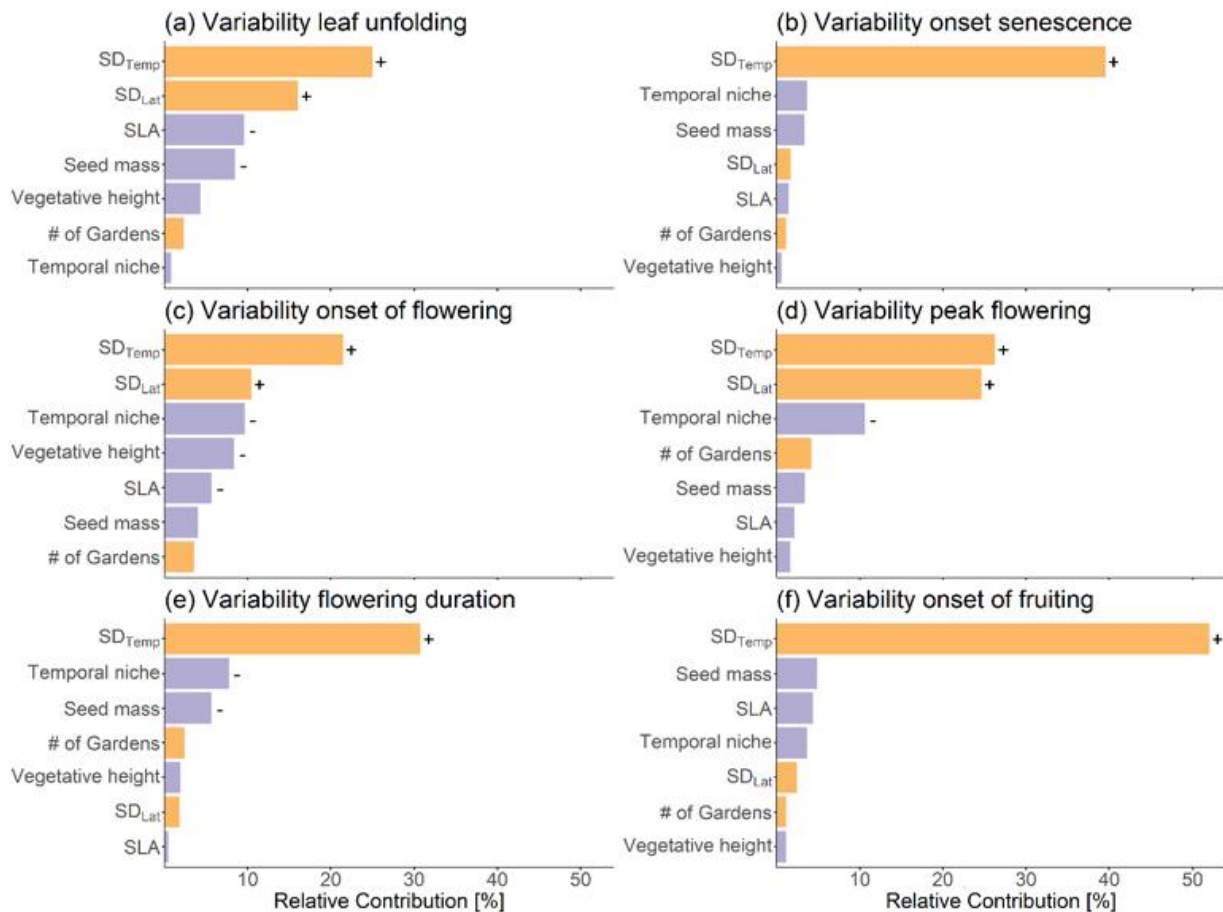


Fig. 1: Relative importance (%) of the variability in environmental factors (orange) and species' functional traits (purple) on the spatial variability of six phenological stages, deduced from boosted regression trees (BRTs). BRTs models were fitted for (a) variability in leaf unfolding, (b) variability in leaf senescence, (c) variability in the onset of flowering, (d) variability in the peak flowering, (e) variability in the flowering duration and (f) variability in the onset of fruiting. For relative contribution of >5% the direction of the association is indicated by the sign next to the bar (“+” = positive association, “-” = negative association); SD<sub>Temp</sub> = standard deviation temperature; SD<sub>Lat</sub> = standard deviation latitude; SLA = Specific leaf area; temporal niche = mean of the day of first flowering across all gardens and years; # of Gardens = number of Gardens included as proxy of within-site variability and management).

Our results showed clearly that herbaceous species in botanical gardens differ in their spatial variability in vegetative and reproductive phenological stages. As expected the results suggest that the spatial variability in temperature resulting from the location of botanical gardens is indeed the most important factor driving the spatial variability in herbaceous species' phenology. However, in addition to that, the variability in latitude being strongly associated to the spatial variability in photoperiod also has an important influence on the variability in phenology but depended on the phenological stage investigated. Compared to the variability in temperature and latitude, also traits helped in explaining species-specific variations in phenological variability. Overall, we found that early-flowering and less competitive species were more variable in their phenology. The observation that the spatial variability in phenology of herbaceous species is not only driven by the variability in temperature might explain why phenological events do not keep pace with climate change (Peaucelle et al., 2019). To gain an even more profound understanding of the spatial variability in the phenology of herbaceous species we suggest for future studies to include aspects of intraspecific trait variability and environmental parameters measured in each garden (e.g., light availability, soil type, watering regimes, weeding frequency, etc.). This would provide a better connection among phenological characteristics and traits measured in botanical gardens and current environmental conditions, and thus reveal how future plants will be affected by and cope with climate change. This study has already been published as a preprint (Rauschkolb et al., 2023).

**References:**

- KATTGE, J., BÖNISCH, G., Díaz, S., LAVOREL, S., PRENTICE, I.C., LEADLEY, P., et al., 2020: TRY plant trait database - enhanced coverage and open access. *Glob Change Biol* **26**(1), 119–188.
- KÖNIG, P., TAUTENHAHN, S., CORNELISSEN, J., HANS, C., KATTGE, J., BÖNISCH, G., RÖMERMANN, C., 2018: Advances in flowering phenology across the Northern Hemisphere are explained by functional traits. *Glob Ecol Biogeogr* **27**(3), 310–321.
- NORDT, B., HENSEN, I., BUCHER, S.F., FREIBERG, M., PRIMACK, R.B., STEVENS, A-D., et al., 2021: The PhenObs initiative: A standardised protocol for monitoring phenological responses to climate change using herbaceous plant species in botanical gardens. *Funct Ecol* **35**(4)821–834.
- PEAUCELLE, M., JANSSENS, I.A., STOCKER, B.D., FERRANDO, A.D., FU, Y.H., MOLOWNY-HORAS, R., et al., 2019: Spatial variance of spring phenology in temperate deciduous forests is constrained by background climatic conditions. *Nature Commun* **10**, 5388.
- RAUSCHKOLB, R., BUCHER, S.F., HENSEN, I., AHRENDTS, A., FERNÁNDEZ-PASCUAL, E., HEUBACH, K., et al., 2023: Spatial variability in herbaceous plant phenology is mostly explained by variability in temperature but also by photoperiod and functional traits. Preprint submitted to *Int J Biometeorology* (<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3572527/v1>, under review).
- STEMKOVSKI, M., BELL, J.R., ELLWOOD, E.R., INOUE, B.D., KOBORI H., LEE, S.D., et al., 2023: Disorder or a new order: How climate change affects phenological variability. *Ecology* **104**(1), e3846.
- ZHANG, X., TAN, B., YU, Y., 2014: Interannual variations and trends in global land surface phenology derived from enhanced vegetation index during 1982–2010. *Int J Biometeorology* **58**, 547–564.

**Keywords:** Botanical Garden, Climate Change, Flowering Onset, Functional Traits, Spatial Variability, PhenObs

## Pflanzenmeldungen: Ein Crowd-Sourcing Ansatz zur Ergänzung des stationären phänologischen Beobachtungsnetzes des DWD

*Rafael Posada, Saskia Lifka*

Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main (Deutschland)

### Einleitung

Der Deutsche Wetterdienst betreibt seit 1951 ein eigenes phänologisches Beobachtungsnetz. Es geht hierbei um die Pflanzenphänologie im Sinne der im Jahresablauf periodisch wiederkehrenden Wachstums- und Entwicklungserscheinungen der Pflanzen. Die Eintrittszeiten charakteristischer Vegetationsstadien (Phasen) werden von Ehrenämtern beobachtet und festgehalten. Neben Wild- und Obstpflanzen sind auch landwirtschaftliche Kulturen im Beobachtungsprogramm enthalten. Die Phänologie hat in der Öffentlichkeit und der Wissenschaft zunehmend an Aufmerksamkeit und Bedeutung gewonnen, da der Zeitpunkt der pflanzlichen Entwicklungsstadien weitgehend von den Umweltbedingungen abhängt und sich dadurch als guter Indikator für den Klimawandel eignet. Außerdem, spielt die Phänologie eine wesentliche Rolle bei Ökosystemprozessen wie dem Kohlenstoff- und Nährstoffkreislauf (Katal et al., 2022).

### Stationäres phänologisches Beobachtungsnetz des DWD

Das phänologische Beobachtungsnetz des DWD, was aus knapp über 1000 ehrenamtlich arbeitenden Personen besteht, die an festgelegten Stationen beobachten, setzt sich aus zwei unterschiedlichen Beobachtungsprogrammen zusammen. Zum einen gibt es seit 1951 die sogenannten Jahresmelder. Diese melden bis zu 184 Phasen und führen Ihre Beobachtungen nach Möglichkeit immer an den gleichen Pflanzen durch. Die Zumeldung an den DWD erfolgt spätestens am Jahresende und die Daten werden vor allem für Forschungszwecke genutzt. Seit 1992 gibt es zusätzlich die sogenannten Sofortmelder. Diese melden bis zu 83 Phasen und führen ihre Beobachtungen immer an den frühesten Pflanzen in ihrer Umgebung durch (DWD, 1995). Die Meldung an den DWD erfolgt umgehend und kann beispielsweise direkt für die agrarmeteorologische Modellierung, Beratung und die Pollenflugvorhersage genutzt werden. Die aktuelle Pflanzenentwicklung kann sofort erfasst und ins Verhältnis zur vieljährigen Entwicklung gesetzt werden.

### Pflanzenmeldungen über die WarnWetter-App

Seit März 2023 ist es möglich auch über die Vollversion der DWD WarnWetter-App phänologische Meldungen abzugeben. Die Meldungen anderer Nutzer können ebenfalls gesehen werden (siehe Abb.1).

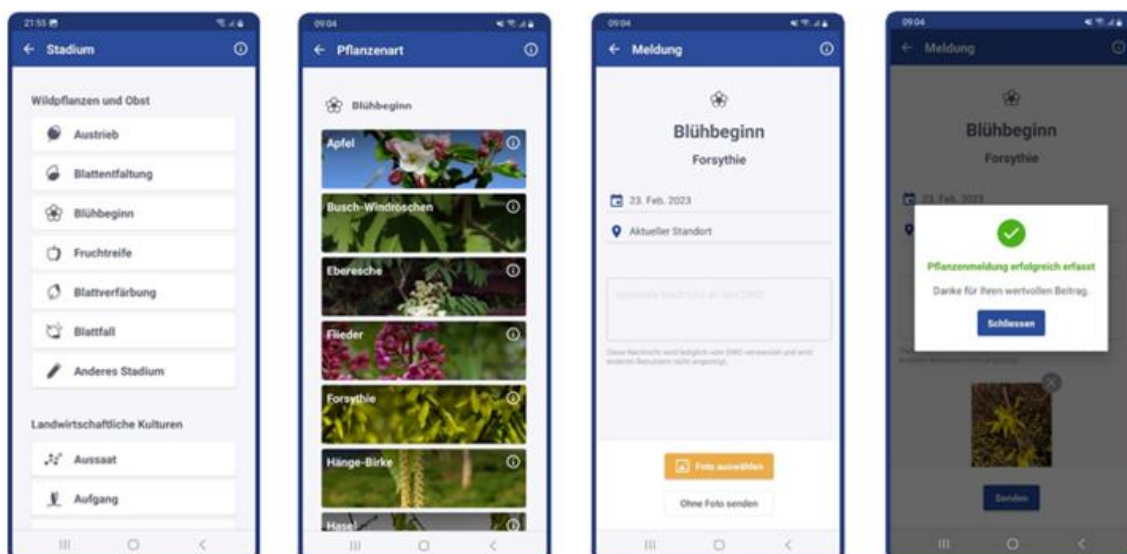


Abb. 1: Eingabemasken für Pflanzenmeldungen über die WarnWetter-App des DWD.

Diese neue Funktionalität verstärkt die Erfahrung des DWD im Bereich „Citizen Science“ und ermöglicht eine Verdichtung der bereits vorhandenen phänologischen Daten. Eine Datenverdichtung ist erstrebenswert für die Modellentwicklung, die Verbesserung der räumlichen Interpolation und die Pollenflugvorhersage. Außerdem sollen über die App neue Beobachterinnen und Beobachter für das stationäre Beobachtungsnetz gewonnen werden.

Bei Meldungen von Phasen, für die bereits lange Datenreihen vorliegen, erfolgt direkt eine klimatische Einordnung. Das heißt, dass die Nutzenden sofort erfahren, ob ihre Meldungen zu früh oder zu spät im Vergleich zum Mittelwert (in der Regel 1991 – 2020) abgegeben wurden. Zum Vergleich werden das vieljährige Deutschland- und Gebietsmittel (Naturraumgruppe) herangezogen.

### Abgeleitete Produkte

Die phänologischen Daten des DWD werden vielzeitig genutzt. Zum Beispiel werden sie dazu verwendet den aktuellen Stand der Pflanzenentwicklung in Deutschland und den Bundesländern darzustellen und die phänologischen Uhren abzubilden (Abb. 2).

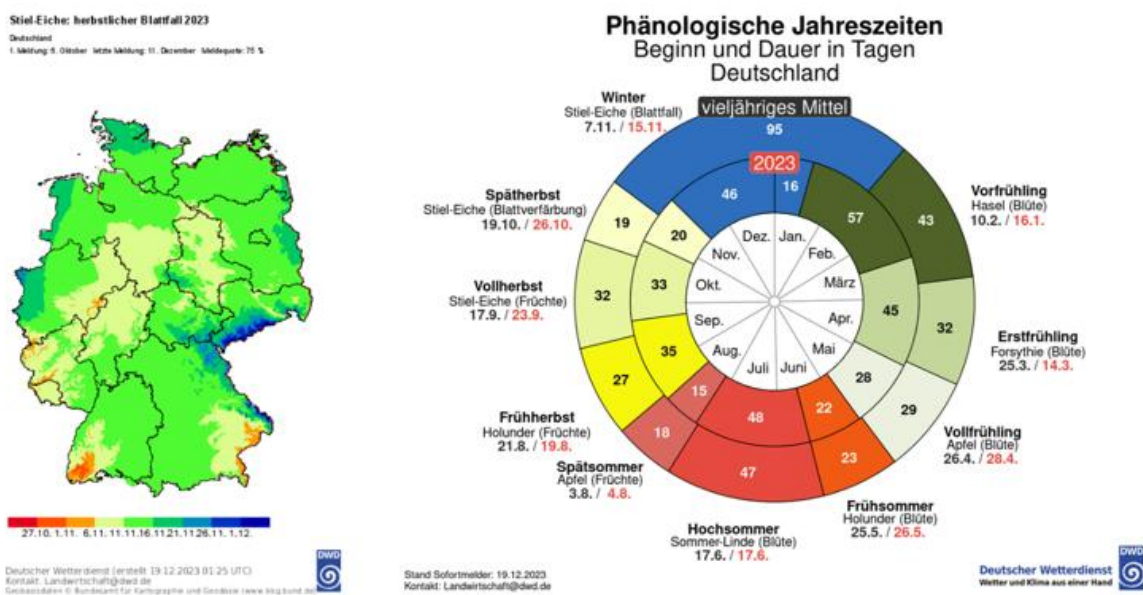


Abb. 2: Produktbeispiele basierend auf den Daten des stationären phänologischen Beobachtungsnetzes (links: herbstlicher Blattfall der Stiel-Eiche 2023; rechts: phänologische Uhr 2023).

Die phänologischen Daten, die über die WarnWetter-App erhoben werden, können ebenfalls für solche Produkte verwendet werden. Die Abbildung 3 zeigt beispielhaft, wie eine Auswertung der Pflanzenmeldungen aussehen könnte.

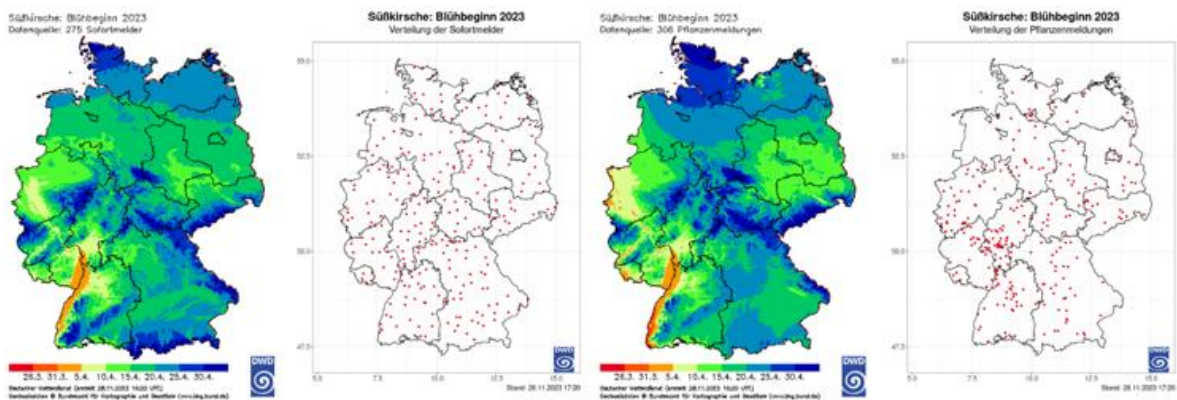


Abb. 3: Blühbeginn der Süßkirsche 2023 (links: anhand der Sofortmelder des stationären phänologischen Beobachtungsnetzes; rechts: anhand der Pflanzenmeldungen über die WarnWetter-App).

### **Zusammenfassung**

Die Pflanzenmeldungen, die über die WarnWetter-App gewonnen werden, haben ein großes Potential und können in vielen Fällen Anwendung finden. Zum Beispiel können sie die Meldungen des stationären Beobachtungsnetzes des DWD ergänzen, um eine bessere räumliche Auflösung zu schaffen, was wiederum ein genaueres Bild der Pflanzenentwicklung in den verschiedenen Regionen Deutschlands ergibt. Sie können aber auch mit anderen Datenquellen kombiniert werden, wie z.B. Fernerkundungsdaten, um die automatische Erkennung der angebauten Kulturen über Satellitenbilder zu erleichtern.

Dieser „Citizen Science“ Ansatz befindet sich noch in der Entwicklung und der DWD arbeitet daran, neue Wege zur Nutzung dieses neuartigen Datensatzes zu finden.

### **Literatur:**

DWD, 2015: Vorschriften und Betriebsunterlagen für die phänologischen Beobachter des Deutschen Wetterdienstes (VuB17). Deutscher Wetterdienst

KATAL, N., RZANNY, M., MÄDER, P., WÄLDCHEN, J., 2022: Deep Learning in Plant Phenological Research: A Systematic Literature. *Front. Plant Sci.* **13**, 1-18 (doi: 10.3389/fpls.2022.805738)

### 3.2 Poster

#### Standardisiertes phänologisches Monitoring von Klima veränderungen

Nicole Kauke<sup>1</sup>, Johanna Lenz<sup>2</sup>, Matthias Zimmer<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Landesamt für Natur, Umwelt und Naturschutz Nordrhein-Westfalen, Koordinierungsstelle Klimaschutz/Klimawandel (Deutschland)

<sup>2</sup>Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Fachzentrum Klimawandel und Anpassung (Deutschland)

<sup>3</sup>Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz, Rheinland-Pfalz Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen (Deutschland)

Die Phänologie befasst sich mit der Abfolge der im Jahresverlauf wiederkehrenden Entwicklungs- und Wachstumserscheinungen von Tieren und Pflanzen. Vielfach hängt der Eintritt bestimmter Entwicklungsphasen von den Witterungsbedingungen der vergangenen Monate ab. Phänologische Beobachtungen über einen langen Zeitraum können somit hervorragend als Klimawandelfolgenindikator eingesetzt werden. Zum Beispiel hängt der Vegetationsbeginn vieler Pflanzen der gemäßigten Breiten von dem Temperaturverlauf im vorangegangenen Winter ab. Deutlich zeigt sich hier eine Verfrühung der Frühlingsphasen.

#### Hessen

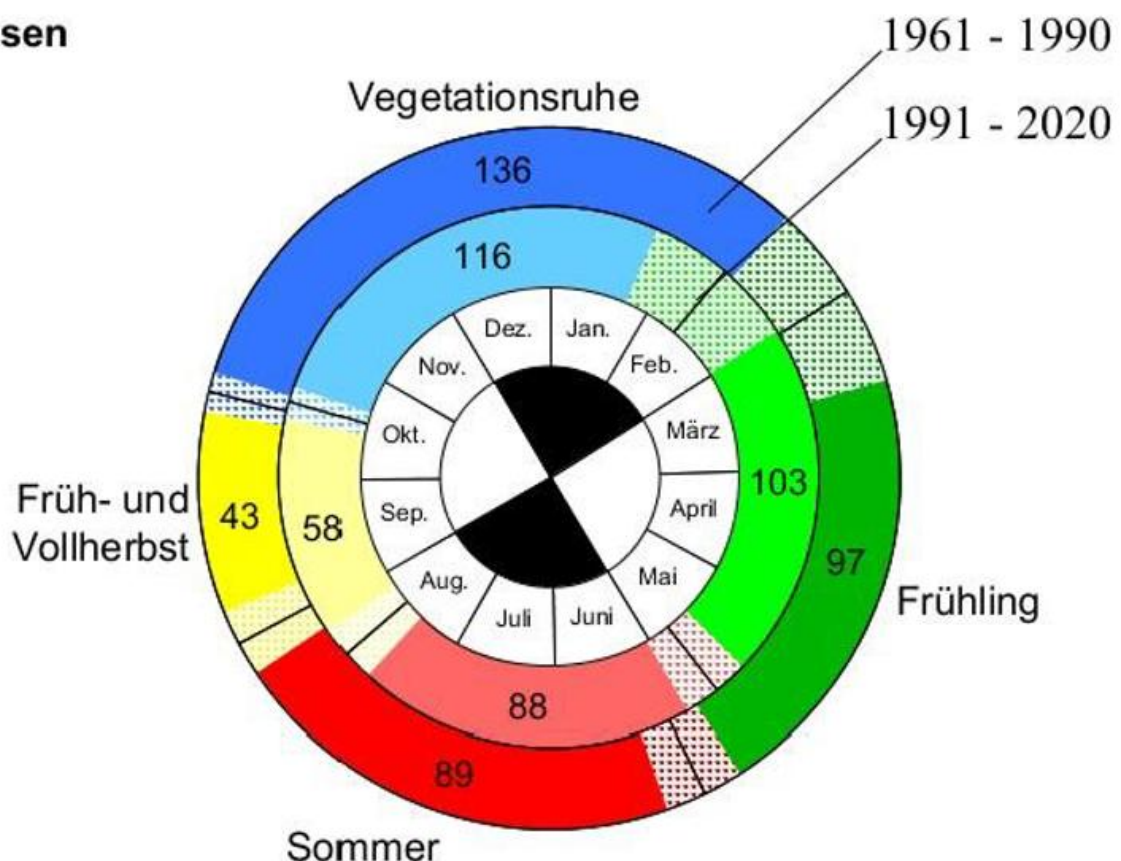


Abb. 1: Doppelte phänologische Uhr für Hessen mit zwei Beobachtungszeiträumen: äußerer Ring 1961- 1990, innerer Ring 1991-2020, schraffierte Bereiche = Standardabweichung.

Quelle: Justus-Liebig-Universität Gießen, Datenquelle: DWD

Veränderungen im Entwicklungsablauf von Organismen haben zum einen Folgen für die betroffene Art selbst, wirken sich aber auch auf die mit ihnen assoziierten Arten und Ökosysteme aus. Es ergeben sich vielfach ökologische Folgen und auch Konsequenzen für die Menschen. Ausbleibender Kältereiz und Frostschäden an weitentwickelten Blüten und Trieben kann zu Ernteaussfällen führen. Milde Winter und lange Vegetationsperioden begünstigen das Aufkommen mancher Schädlinge und die Aus-/Verbreitung von Neobiota, z.B. der Beifußblättrigen Ambrosie. Da verschiedene Arten ihre Phänologie unterschiedlich stark verändern, kann es zu einem ökologischen Mismatch zwischen bisher synchronen Arten kommen, z.B. zwischen Pflanzen und Bestäubern.

Im Rahmen des AK Bioindikation/Wirkungsermittlung wird ein Papier erarbeitet, welches die Notwendigkeit des Erhalts langfristiger phänologischer Beobachtungen, der Fortbestand und Ausbau bestehender Monitoringprogramme, die Vereinheitlichung und Standardisierung von Beobachtungs- und Analysemethoden aufzeigt und beschreibt. Auf Basis von wissenschaftlich fundierten Methoden lassen sich die gewonnenen Erkenntnisse nutzen, um wirksame Strategien für die Anpassung an die Folgen des anthropogenen Klimawandels zu entwickeln, z.B. durch Anbaumaßnahmen und geeignete Sortenwahl in der Landwirtschaft sowie einem entsprechenden Waldumbau in der Forstwirtschaft.

#### **Literatur:**

- GENSSLER L., PEICHL, L. & RAMMERT U. (2011) Bioindikation / Wirkungsermittlung - Arbeitskreis der Landesanstalten und -ämter: Konzeption der künftigen Aufgabenbereiche, Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft 71 Nr. 4, 147 - 150
- SCHLIEP R., BARTZ R., DRÖSCHMEISTER, R., DZIOCK, F., DZIOCK S., FINA S., KOWARIK I., RADTKE, L., SCHAEFFLER, L., SIEDENTOP S., SUDFELDT, C., TRAUTMANN, S., SUKOPP U. & HEILAND, S. (2017) Bundesamt für Naturschutz: Indikatorensystem zur Darstellung direkter und indirekter Auswirkungen des Klimawandels auf die biologische Vielfalt, *BfN Skript* 470, DOI 10.19217/skr470 Bonn – Bad Godesberg
- ROOT, T. L. & HUGHES, L. (2005) Present and Future Phenological Changes in Wild Plants and Animals. In: *Climate Change and Biodiversity*. Lovejoy, T. E. and Hannah, L. (Ed.), Yale University Press. New Haven, Connecticut, 418 S.

**Schlüsselwörter:** Phänologie, Klimawandel, Indikator, phänologische Beobachtung, Vegetationsperiode

## 4 Gesundheit in Zeiten des Klimawandels

### 4.1 Vorträge

#### Herausforderungen Klimawandel bedingter Hitzeextremereignisse – Eine erste bundesweite Studie zu Hitzeaktionsplänen

*Hans-Guido Mücke<sup>1</sup>, Henny Annette Grewe<sup>2</sup>, Theresa Kaiser<sup>3</sup>, Christian Kind<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Umweltbundesamt (UBA), Umwelthygiene, Berlin (Deutschland)

<sup>2</sup>Hochschule Fulda, Gesundheitswissenschaften, Fulda (Deutschland)

<sup>3</sup>adelphi research GmbH, Berlin (Deutschland)

#### Hintergrund

Ausgelöst durch die globale Klimaerwärmung stiegen über die vergangenen Dekaden in Deutschland sowohl die Jahresmitteltemperatur als auch außergewöhnliche Extremwetterereignisse an und mit ihnen u.a. auch das gesundheitliche Risiko für hitzebedingte Krankheits- und Todesfälle. Davon betroffen sind vor allem die Bewohner und Bewohnerinnen städtischer Agglomerationen, im Freien Tätige sowie in besonderem Maße ältere und gesundheitlich vorbelastete Menschen, wie z.B. Untersuchungen zur Hitzemortalität urbaner Ballungsräume, bspw. des Rhein-Main-Gebiets für die Hitzesommer 2003 und 2015, für Berlin und für das Bundesgebiet (2018 bis 2020) zeigen. Klimaprojektionen des Deutschen Wetterdienstes lassen erwarten, dass in den mittleren Breiten Perioden extremer Hitze zukünftig vergleichsweise häufiger, intensiver und von längerer Dauer auftreten werden.

Die nachgewiesenen Gesundheitsfolgen eingetretener Hitzephänomene erfordern die zeitnahe Umsetzung geeigneter, zielführender Anpassungsmaßnahmen sowohl der Verhaltens- und Verhältnisprävention, als auch der Lebensräume zur Steigerung der Adaptationsfähigkeit und Resilienz der Gesellschaft. Mit den 2017 publizierten Bund/Länder-Handlungsempfehlungen zur Erstellung von Hitzeaktionsplänen (HAP) zum Schutz der menschlichen Gesundheit (BMU 2017) der „Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel“ (DAS) wurde ein fachlich abgestimmter, übergeordneter Rahmen für die Vorbereitung kurz-, mittel- und langfristiger Interventions- und Anpassungsmaßnahmen zum präventiven Gesundheitsschutz und deren gezielte Umsetzung auf Ebene der Städte und Gemeinden geschaffen. Zwischen 2019 und 2023 wurde die erste bundesweite Studie „Analyse von Hitzeaktionsplänen und gesundheitlichen Anpassungsmaßnahmen an Hitzeextreme in Deutschland / HAP-DE“ zu den Erfolgen und Hemmnissen bei der Umsetzung der Handlungsempfehlungen durchgeführt. Methodische Basis hierfür waren eine Online-Erhebung, eine Behörden-Interviewserie sowie eine Analyse von Fallstudien zu ersten angestoßenen Entwicklungen von Anpassungsmaßnahmen.

#### Ergebnisse

In jüngerer Vergangenheit untersuchten Studien die gesundheitlichen Auswirkungen von Hitzeereignissen auf die Bevölkerung in Deutschland für unterschiedliche räumliche Skalen und schufen damit eine wichtige evidenzbasierte Grundlage für die Einschätzung hitzebedingter Effekte auf die Morbidität und Mortalität (u.a. Steul et al., 2018; Winklmayr et al., 2023). Um zeitnah den Schutz der öffentlichen Gesundheit vor den zukünftigen Herausforderungen durch Hitzeextreme fokussiert anzugehen und eine bestmögliche Prävention gegenüber Hitzeeffekten vorzubereiten, wurde im Auftrag des Bundesumweltministeriums und vom Umweltbundesamt fachbegleitet das Forschungsprojekt „HAP-DE“ (2019-2023) durchgeführt. Mit einer bundesweiten Studie wurden Klimaanpassungsmaßnahmen zum Schutz der menschlichen Gesundheit vor Hitze, die Evaluation der Anwendung und Wirkung der HAP-Handlungsempfehlungen erhoben. Ein Ziel war zu untersuchen ob, wie und mit welcher Wirkung sie seit ihrer Veröffentlichung 2017 von den Bundesländern und Kommunen aufgegriffen und welche Pläne und Anpassungsmaßnahmen zur Vermeidung von gesundheitlichen Hitzeschäden bereits geplant bzw. umgesetzt werden. Die nachfolgenden Ergebnisse der Studie wurden bei Janson et al. 2023 publiziert.

Ein essentieller Teil der Studie war die im Frühjahr 2020 - gerade zu Beginn der COVID19-Pandemie durchgeführte bundesweite Online-Erhebung zu Kenntnissen und Wirkung der HAP-Handlungsempfehlungen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Gesundheitsrelevanz von Hitze als Querschnittsthema auf den Ebenen des Bundes, der Länder und Kommunen präsent ist und sich sowohl die Umwelt- als auch Gesundheitsressorts hiermit beginnen zu befassen. Aus den Rückmeldungen der Gesundheitsämter ist festzustellen, dass die Empfehlungen dort mindestens ebenso gut bekannt sind, wie innerhalb des Umweltsektors. Mehr als 75 % der Studienteilnehmenden begrüßen diese als eine erste bundesweit verfügbare Anpassungsmaßnahme zur Hitzeprävention und beurteilen sie überwiegend als eine hilfreiche Basis für ihre Arbeit und einen gut verständlichen und strukturierten Leitfaden für einen HAP. Darüber hinaus wird dokumentiert, dass die Empfehlungen in einigen Bundesländern und Kommunen bereits eine Reihe von Impulsen und Entwicklungen angestoßen haben bzw. erste gesundheitsbezogene Anpassungsmaßnahmen zur Hitzeprävention initiiert wurden.

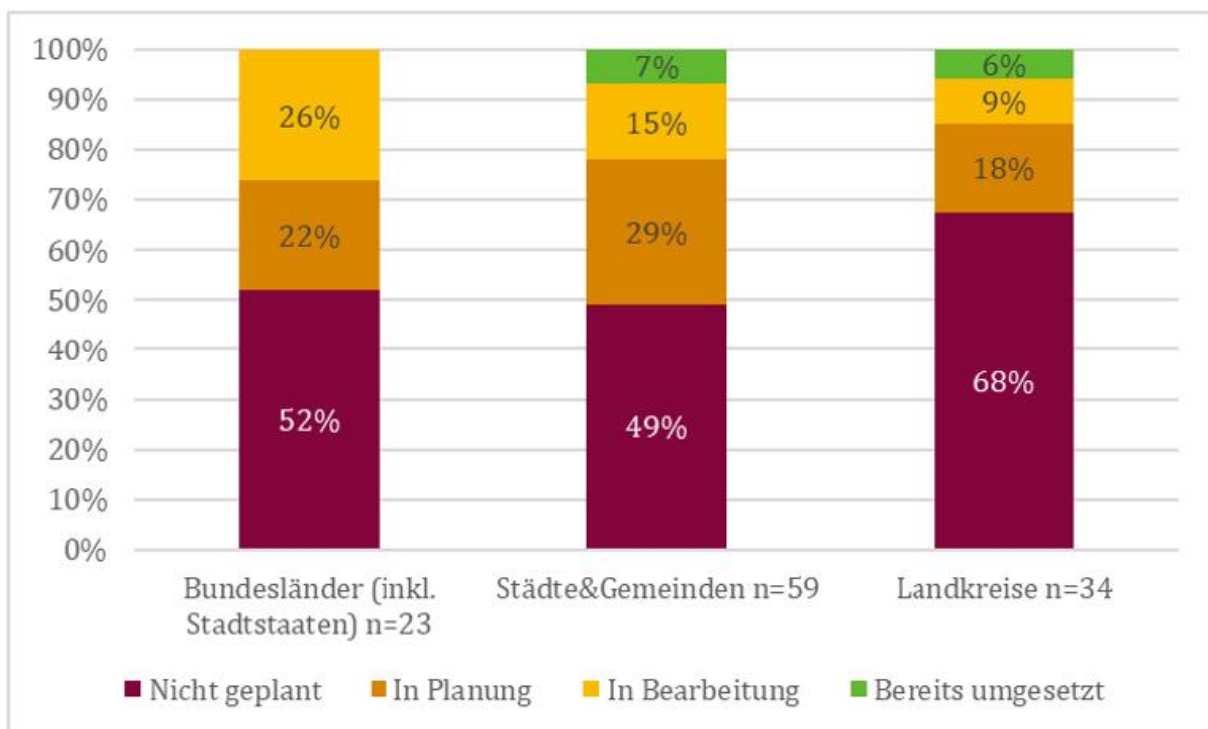


Abb. 1: Umsetzungsstand Hitzeaktionspläne auf Ebene des Bundes, der Länder und Kommunen in Deutschland; Stand 2020 (Janson et al., 2023).

Andererseits ist eine komplette Implementierung und Umsetzung eines HAP bislang auf keiner administrativen Ebene in Deutschland erfolgt, obgleich die Empfehlungen allseits bekannt sind und vereinzelt einige Hitze-Anpassungsmaßnahmen bereits ergriffen wurden, wie z.B. zur individuellen Akut-Anpassung, u.a. regelmäßig und ausreichend trinken, leichte Kleidung tragen und schattige Plätze aufsuchen sowie vor direkter Sonnenstrahlung schützen. Die Anzahl von weiteren Projekten und lokalspezifischen Anpassungsmaßnahmen erfährt in Deutschland seither eine Beschleunigung und ist deutlich gewachsen.

Die Federführung für die Umsetzung der Empfehlungen wird auf Bundesländerebene oft dem Gesundheitssektor zugeordnet. Auf kommunaler Ebene zeigt sich, dass neben Gesundheitsämtern auch Umwelt-, Stadtplanungs- und Grünflächenämter sowie der Bau-, Energie- und Gebäudesektoren beteiligt sind. Ferner wurde identifiziert, dass das Thema Hitze und Gesundheit in den Bundesländern und Kommunen neben der Verwaltung auch in der Politik präsent ist. Während die Bundesländerebene angibt, dass Hitzeschutz und -vorsorge bereits bei politischen Entscheidungen berücksichtigt wird, ist auf kommunaler Ebene der Stellenwert vor allem im Verwaltungshandeln hoch. Im Vergleich dazu sind Hitze- und Gesundheitsthemen auf Landkreisebene bislang noch von geringerer Bedeutung. Zudem

zeigen die Erhebungsergebnisse, dass die Bundesländer und Kommunen in der Kommunikation und Umsetzung von Informationen und Bildungsmaterialien zur vorbereitenden Eigenvorsorge gegenüber Hitzeextremen zur Steigerung der Verhaltensprävention schon aktiv sind. Hierbei handelt es sich häufig um niedrigschwellige, leicht umzusetzende Anpassungsmaßnahmen im individuellen Bereich. Einige Städte, wie z.B. Erfurt, Köln und Nürnberg listen beispielsweise auf ihren Webseiten Tipps zum adäquaten Individualverhalten bei Hitze für ihre Bürgerinnen und Bürger auf. Soweit verwaltungsseitig möglich, werden erste Anpassungsmaßnahmen eingeleitet, die aus Betroffenheits- bzw. Vulnerabilitätsanalysen resultieren. Die Analyse der Erhebung zeigt darüber hinaus, dass allein die Existenz und Bekanntheit der HAP-Handlungsempfehlungen nicht ausreicht, damit Kommunen erfolgreich HAP er- bzw. bearbeiten können. So fehlt es vielen Kommunen etwa an Finanzmitteln und Personalressourcen, um HAP zu entwickeln und zu implementieren. Auch wird auf das Fehlen einer rechtlichen Basis hingewiesen, die ein verbindliches Handeln mit eingeplanten und budgetierten Ressourcen ermöglicht.

### Fazit

Das „HAP-DE“ Projekt schlussfolgert, je höher der durch die Betroffenheit einzuordnende Stellenwert des Themas Hitze und Gesundheit in Politik und Verwaltung ist, z.B. wegen eines nachweislich erhöhten Gesundheitsrisikos der Bevölkerung in einer betroffenen Stadt oder Region, desto häufiger wird in den jeweiligen Ländern/Kommunen mindestens eine Anpassungsmaßnahme geplant bzw. aktuell umgesetzt. Die Studie identifiziert aber auch Mängel bei den Empfehlungen hinsichtlich der Auswertung und Evaluation von Interventionsmaßnahmen eines HAP. So fehle es neben einer probaten Systematik auch an konkreten Hinweisen für ein geeignetes Monitoring (z.B. durch ein zeitnahes Morbiditäts- und Mortalitätsmonitoring im Sinne einer „real time surveillance“, ähnlich denen in Frankreich und Italien) sowie an Angaben zur Finanzierungs- und Personalausstattung, durch die die Empfehlungen schlussendlich in einen nachhaltigen HAP übertragen werden können.

Es kann festgestellt werden, dass nach der Einführung, Verbreitung und Bewerbung der HAP-Handlungsempfehlungen die Anzahl der Hitze bezogenen präventiven Maßnahmen und Projekte in Deutschland stetig steigt, zunächst überwiegend in Städten. Hierzu zeigt eine internetbasierte Studie aus 2021 eine Analyse zur Klimaanpassung, zum Klimaschutz bzw. zu HAP von deutschen Groß- und Mittelstädten (>100.000 Einwohner/-innen), nach der 51 von 70 Städten gesundheitsbezogene Hitzeanpassungsmaßnahmen begonnen hatten zu planen bzw. zu entwickeln, 41 Städte haben solche Maßnahmen bereits in Konzepte integriert (Hannemann et al., 2023).

### Literatur:

BMU Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (Hrsg.) (2017). Handlungsempfehlungen für die Erstellung von Hitzeaktionsplänen zum Schutz der menschlichen Gesundheit. Version:1.0,30Seiten.

[https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Klimaschutz/hap\\_handlungsempfehlungen\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/hap_handlungsempfehlungen_bf.pdf)

HANNEMANN, L., JANSON D., GREWE, HA., BLAETTNER, B., MÜECKE, HG (2023). Heat in German cities: A study on existing and planned measures to protect human health. *J Public Health (Berl.)*. 10.1007/s10389-023-01932-2.

JANSON D., KAISER T., KIND C., HANNEMANN L., NICKL J., GREWE, HA., (2023) Analyse von Hitzeaktionsplänen und gesundheitlichen Anpassungsmaßnahmen an Hitzeextreme in Deutschland. *Umweltbundesamt(Ed)Umwelt&Gesundheit* 03/2023. [www.umweltbundesamt.de/publikationen/analyse-von-hitzeaktionsplaenen-gesundheitlichen](http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/analyse-von-hitzeaktionsplaenen-gesundheitlichen)

STEUL KS., LATASCH L., JUNG HG., HEUDORF U. (2018). Morbidität durch Hitze—Eine Analyse der Krankenhauseinweisungen per Rettungseinsatz während einer Hitzewelle 2015 in Frankfurt/Main. *Gesundheitswesen*, **80**, S. 353–359.

WINKLMAYR C., MATTHIES-WIESLER F., MUTERS S., BUCHIEN S., KUCH B., an der HEIDEN M, MUECKE HG., (2023). Hitze in Deutschland: Gesundheitliche Risiken und Maßnahmen zur Prävention. *Journal of Health Monitoring* · 2023 **8** (S4). <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37799534/> Robert Koch-Institut, Berlin

**Schlüsselwörter:** Klimawandel, Hitzeextreme, Hitzeaktionspläne, Anpassungsmaßnahmen, Gesundheit

## Thermische Belastung in Innenräumen des Universitätsklinikums Freiburg auf der Grundlage kontinuierlicher und verteilter Innenraummessungen im Sommer 2023

*Katharina Epp<sup>1</sup>, Andreas Christen<sup>1</sup>, Andreas Matzarakis<sup>2</sup>, Daniel Steinmann<sup>3</sup>, Markus Sulzer<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Professur für Umweltmeteorologie, Fakultät für Umwelt und Natürliche Ressourcen, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg (Deutschland)

<sup>2</sup>Zentrum für Medizin-Meteorologische Forschung, Deutscher Wetterdienst (Deutschland)

<sup>3</sup>Betriebsärztlicher Dienst, Universitätsklinikum Freiburg (Deutschland)

Mit zunehmender Häufigkeit, Intensität und Dauer von Hitzewellen und den daraus resultierenden gesundheitlichen Folgen für Menschen rücken kritische Infrastruktur-Einrichtungen, in denen sich gegenüber Hitzestress besonders vulnerable Bevölkerungsgruppen befinden, immer mehr in den Fokus. Hierzu zählen insbesondere Krankenhäuser, welche einen erhöhten Anteil an älteren Menschen sowie Menschen mit Vorerkrankungen aufweisen und in welchen gleichzeitig auch Personal unter belastenden Bedingungen rund um die Uhr arbeiten muss. Zu den Auswirkungen von Hitzewellen auf die Innentemperatur und damit auch auf den thermischen Komfort von Patientinnen und Patienten sowie von Beschäftigten in deutschen Krankenhäusern, welche größtenteils nicht klimatisiert sind, ist jedoch wenig bekannt.

Obwohl bekannt ist, dass Innentemperaturen grundsätzlich dem Verlauf der Außentemperaturen folgen, wird für gleiche Außentemperaturen eine große Spannweite an Innentemperaturen gemessen (Quinn et al., 2014; Walikewitz et al., 2018). Unterschiede in Innentemperaturen werden durch abweichendes Verhalten und verschiedene Gebäudeeigenschaften erklärt. Studien mit Fokus auf hitzewellenbedingter Hitzebelastung in Krankenhäusern wurden bisher nahezu ausschließlich in Großbritannien durchgeführt. Im Addenbrooke's Hospital in Cambridge wurden 2010 erhöhte Temperaturen insbesondere in Räumen ohne Fenster, und niedrigere Temperaturen in Fensternähe gemessen (Lomas et al., 2012). Messungen in zwei englischen Krankenhäusern in 2011 und 2012 zeigten versetzte Tagesgänge zwischen ost- und westausgerichteten Räumen, und einen geringeren Einfluss von Außentemperaturen auf Innentemperaturen in Altbauten verglichen mit Leichtbaugebäuden (Iddon et al., 2015). Die neueste Studie maß 2018 Innentemperaturen in der Gynäkologie-Abteilung des Royal Berkshire Hospital und stellte in allen untersuchten Räumen Hitzestress fest, wobei die höchsten Temperaturen in Räumen mit Außenwänden gemessen wurden (Gough et al., 2019). Insgesamt wurde jedoch keine Studie identifiziert, die meteorologische Messungen des Innenraumklimas verteilt über mehrere Krankenhausabteilungen ohne flächendeckende Klimatisierung über einen ganzen Sommer hinweg analysiert.

Ziel dieser Studie war es, räumliche und zeitliche Hitze-Hotspots im Universitätsklinikum Freiburg zu identifizieren, und somit einen Einblick in auftretenden Hitzestress in einem deutschen Krankenhaus während eines Sommers im 21. Jahrhundert zu erhalten. Leitende Untersuchungsschwerpunkte hierfür waren Häufigkeit und Dauer von auftretendem Hitzestress in Innenräumen des Krankenhauses, Zusammenhänge zwischen Hitzestress in Innenräumen und Dauer und Intensität von Hitzewellen im Außenbereich, sowie Unterschiede im Hitzestress zwischen verschiedenen Krankenhausabteilungen und die daraus folgende Vulnerabilität verschiedener Betriebsabläufe.

Die Messwerte für Innenräume des Universitätsklinikums wurden im Rahmen des vom ERC geförderten Forschungsprojekts „urbisphere“ durch low-cost Sensorsysteme („Mobile Biometeorological System“, MoBiMet) gesammelt (Sulzer et al., 2022). Die Sensoren messen alle fünf Minuten neben der Lufttemperatur ( $T_a$ ) auch weitere meteorologische Parameter (Luftfeuchte, Luftbewegung, Strahlung), mit denen direkt die Physiologisch äquivalente Temperatur (PET) als thermischer Index berechnet wird. Die PET wurde für eine standardisierte Person (männlich, 35 Jahre, 1.75 m, 75 kg) mit einer Kleidung von 0.9 clo und einer Arbeitsleistung von 80 W berechnet. Daten wurden von 65 MoBiMets in elf verschiedenen Abteilungen des Universitätsklinikums gesammelt, verteilt auf Räume unterschiedlicher Nutzung und Ausrichtung, und variierenden Stockwerken in Gebäuden unterschiedlichen Alters. Für die Analyse wurde der Zeitraum vom 15. Mai – 30. September 2023 gewählt. Aus den gemessenen

Werten wurden für die Analyse Stundenmittelwerte berechnet. Die durchschnittliche Datenverfügbarkeit in diesem Zeitraum betrug 96.7%. Fünf MoBiMets mit einer Datenverfügbarkeit geringer als 87% wurden von der weiteren Analyse ausgeschlossen, um Ungenauigkeiten zu vermeiden. Von den verbleibenden 60 MoBiMets wiesen 24 noch Datenlücken auf, welche durch GBM Imputation der R Funktion `gbmimpute` des Packages `imputation` gefüllt wurden (R Core Team 2023). Die Schwellenwerte für Hitzestress wurden für die  $T_a$  vom Ausschuss für Arbeitsstätten (2022) übernommen, für die PET von Matzarakis et al. (1999). Die Außendaten für diese Studie wurden durch einen in ein stadtweites Netzwerk eingebundenen Sensor in direkter Nähe des Universitätsklinikums gesammelt. Verwendet wurden  $T_a$ -Stundenmittelwerte. Hitzewellen wurden in dem Zeitraum basierend auf mehreren aufeinanderfolgenden Tagen mit Hitzewarnungen des DWD definiert. In den Zeitraum fielen drei Hitzewellen, jeweils vom 19. – 22. Juni, 8. – 11. Juli, und 13. – 24. August (Deutscher Wetterdienst 2023).

Mit der Ausnahme von drei MoBiMets in klimatisierten Räumen wurde in allen Räumen der Schwellenwert von  $T_a > 26$  °C überschritten. 45 der 60 MoBiMets registrierten eine  $T_a > 30$  °C, und sechs eine  $T_a > 35$  °C. Der Schwellenwert von  $PET > 23$  °C wurde in allen Räumen mit einer Mindestdauer von 334 Stunden überschritten. 49 MoBiMets maßen eine  $PET > 29$  °C, moderatem Hitzestress entsprechend, und an 17 MoBiMets wurde die Marke von einer  $PET > 35$  °C für starken Hitzestress überschritten (s. Abb. 1).

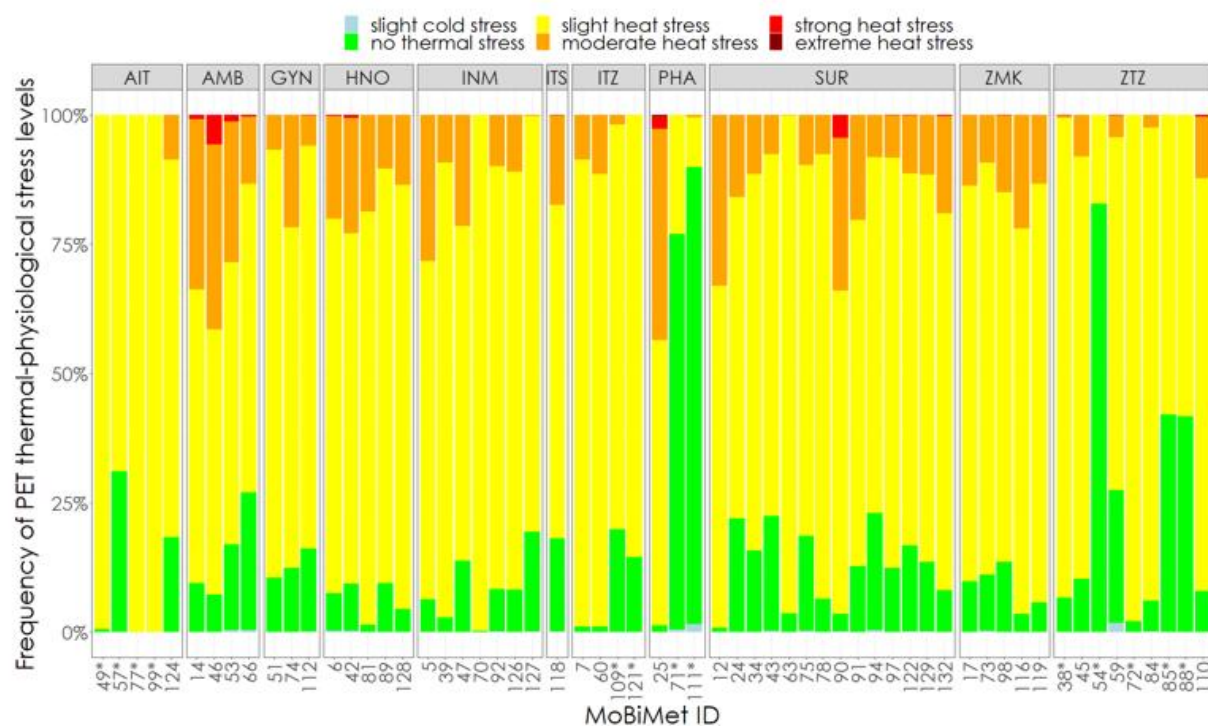


Abb. 1: Relative Häufigkeit thermischer Stresslevel nach PET-Schwellenwerten an den verschiedenen MoBiMets gruppiert nach Krankenhausabteilung.

Der mittlere Tagesgang der  $T_a$  draußen, der mittleren  $T_a$  drinnen und der mittleren PET drinnen waren während Hitzewellen deutlich erhöht gegenüber den Tagen ohne Hitzewarnungen. Hervorzuheben ist, dass 13 der 18 an der Außenmessstelle am Universitätsklinikum gemessenen Tropennächte während Hitzewellen auftraten, was sich in den drinnen gemessenen  $T_a$ -Werten widerspiegelt. Während der durchschnittliche Tagestiefstwert der  $T_a$  drinnen außerhalb von Hitzewellen unterhalb des  $T_a$ -Schwellenwertes von 26 °C für Hitzestress lag, lag er während Hitzewellen darüber (s. Abb. 2). Die Hitzewelle im August von ausgeprägter Länge und Intensität zeigte einen geringeren Anteil an leichtem

Hitze stress, dafür aber einen größeren Anteil an moderatem und starkem Hitze stress im Vergleich zu den anderen zwei Hitze wellen.

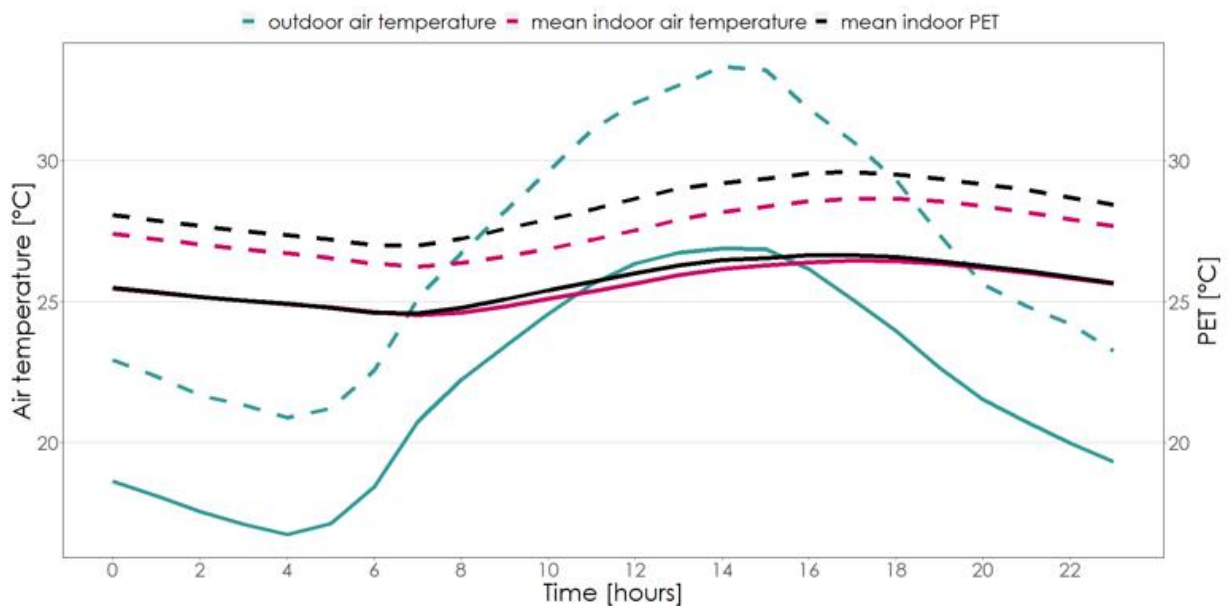


Abb. 2: Mittlerer Tagesgang für  $T_a$  draußen (türkis), mittlere  $T_a$  drinnen (magenta), und mittlere PET drinnen (schwarz) während Hitze wellen (gestrichelte Linien) und Zeiträumen ohne Hitze wellen (durchgezogene Linien).

Der mittlere PET-Tagesgang war in klimatisierten Räumen grundsätzlich von niedrigeren Werten und einer geringeren Amplitude geprägt als der Durchschnitt. Räume mit nordöstlicher Ausrichtung zeigten die niedrigsten PET-Werte und erreichten ihr tägliches PET-Maximum am frühesten. Räume mit Fenstern in mehreren Ausrichtungen wiesen die höchste PET-Amplitude und die höchsten PET-Maxima auf, während Räume ohne Fenster das höchste PET-Minimum verzeichneten. Der mittlere PET-Tagesgang unterschied sich auch zwischen Räumen auf verschiedenen Stockwerken. Die PET war im vierten und sechsten Stock grundsätzlich höher als auf niedrigeren Stockwerken. Gruppirt nach Gebäudealter war die PET in Gebäuden mit Baujahr 1990 oder später am niedrigsten, und mit Baujahr zwischen 1950 und 1990 am höchsten.

Insgesamt trat Hitze stress nach  $T_a$ -Schwellenwerten fast überall, und nach PET-Schwellenwerten in allen untersuchten Räumen auf, während durchschnittlich 80 % der Zeit. Zeitliche Hitze-Hotspots treten während Hitze wellen aufgrund von hohen Tageswerten und vor allem mangelnder nächtlicher Abkühlung auf. Räumliche Hitze-Hotspots befinden sich überwiegend in nicht klimatisierten Räumen, mit mehreren Ausrichtungen oder keinen Fenstern, auf hohen Stockwerken in zwischen 1950 und 1990 errichteten Gebäuden. Dies trifft vor allem auf die Abteilungen AMB, HNO, INM, SUR und ZMK zu.

Die verschiedenen Nutzergruppen des Universitätsklinikums weisen unterschiedliche Vulnerabilitäten für auftretenden Hitze stress auf. Patientinnen und Patienten sind aufgrund interner Faktoren grundsätzlich am vulnerabelsten gegenüber Hitze stress. Insbesondere stationäre Patientinnen und Patienten sind nicht nur tagsüber, sondern auch nachts auftretendem Hitze stress ausgesetzt. Die Hitzebelastung für diese Gruppe hängt jedoch auch von persönlichen Fähigkeiten und unterstützenden Aspekten wie möglichem Fensteröffnen und Kleidungsanpassung ab, und lässt sich daher nicht vollständig von  $T_a$ - und PET-Messungen ableiten. Mitarbeitende sind hauptsächlich aufgrund externer Faktoren, nämlich ihrer physischen Arbeitsleistung und den Gebäudeeigenschaften, gegenüber Hitze stress vulnerabel. Vor allem körperlich sehr aktive Mitarbeitende und diejenigen an Büro-Arbeitsplätzen in Räumen ohne Fenster sind einer hitzebedingten Stressbelastung ausgesetzt, welche durch die hier verwendeten Parameter zur PET-Berechnung möglicherweise unterschätzt und durch zusätzliche Stressfaktoren in Form von ungünstigen Arbeitsverhältnissen verstärkt wird. Studierende sind im Kontext des Universitätsklinikums die Nutzergruppe mit der geringsten Vulnerabilität, nutzen

jedoch die Räume mit den höchsten Anteilen an auftretendem Hitzestress. Aufgrund des flächendeckend auftretenden Hitzestresses und die daraus resultierende Belastung für Patientinnen und Patienten sowie Mitarbeitende könnte in Fällen intensiver und langanhaltender Hitze das vorübergehende Aussetzen ausgewählter Krankenhausfunktionen unausweichlich sein, wie es bereits in anderen Krankenhäusern der Fall gewesen ist (Brooks et al., 2023).

Die hohe Häufigkeit und teilweise große Intensität von auftretendem Hitzestress im Universitätsklinikum Freiburg erfordern Maßnahmen zur Prävention und Entlastung hiervon. Am wirkungsvollsten wird eine Kombination aus kurz- und langfristigen Maßnahmen eingeschätzt. Hierzu zählen zum Beispiel konsequentes nächtliches Lüften, die Verlegung besonders gefährdeter Patientinnen und Patienten in kühlere Bereiche mit weniger Hitzestress, die Sicherstellung ausreichender Arbeitspausen in thermisch nicht belastenden Räumen, die flächendeckende Installation von Außenbeschattungsmöglichkeiten an Fenstern, sowie alternative Kühlungsstrategien wie die solare Kühlung durch Photovoltaik (Lundgren-Kownacki et al., 2018).

#### **Literatur:**

Ausschuss für Arbeitsstätten, 2022: Technische Regeln für Arbeitsstätten: Raumtemperatur.

Brooks, K., Landeg, O., Kovats, S., Sewell, M., OConnell, E., 2023: Heatwaves, hospitals and health system resilience in England: a qualitative assessment of frontline perspectives from the hot summer of 2019. *BMJ Open* **13**(3), e068298.

Deutscher Wetterdienst, 2023: Heat Alerts 2023. *Open Data Center*.

Gough, H., Faulknall-Mills, S., King, M., Luo, Z., 2019: Assessment of Overheating Risk in Gynaecology Scanning Rooms during Near-Heatwave Conditions: A Case Study of the Royal Berkshire Hospital in the UK. *International Journal of Environmental Research and Public Health* **16**(18), 3347.

Iddon, C.R., Mills, T.C., Giridharan, R., Lomas, K.J., 2015: The influence of hospital ward design on resilience to heat waves: An exploration using distributed lag models. *Energy and Buildings* **86**, 573–588.

Lomas, K.J., Giridharan, R., 2012: Thermal comfort standards, measured internal temperatures and thermal resilience to climate change of free-running buildings: A case-study of hospital wards. *Building and Environment* **55**, 57–72.

Lundgren-Kownacki, K., Hornyanszky, E.D., Chu, T.A., Olsson, J.A., Becker, P., 2018: Challenges of using air conditioning in an increasingly hot climate. *International Journal of Biometeorology* **62**(3), 401–412.

Matzarakis, A., Mayer, H. and Iziomon, M.G., 1999: Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. *International Journal of Biometeorology* **43**, 76–84.

Quinn, A., Tamerius, J.D., Perzanowski, M., Jacobson, J.S., Goldstein, I., Acosta, L., Shaman, J., 2014: Predicting indoor heat exposure risk during extreme heat events. *Science of The Total Environment* **490**, 686–693.

R Core Team, 2023: R: A Language and Environment for Statistical Computing. *R Foundation for Statistical Computing*.

Sulzer, M., Christen, A. and Matzarakis, A., 2022: A Low-Cost Sensor Network for Real-Time Thermal Stress Monitoring and Communication in Occupational Contexts. *Sensors* **22**(5), 1828.

Walikewitz, N., Jänicke, B., Langner, M., Endlicher, W., 2018: Assessment of indoor heat stress variability in summer and during heat warnings: a case study using the UTCI in Berlin, Germany. *International Journal of Biometeorology* **62**(1), 29–42.

**Schlüsselwörter:** Hitzebelastung, Hitzestress, Innenräume, Krankenhaus, low-cost Sensorsystem, PET

## Prävalenz von Wetterfühligkeit in Deutschland

*Kathrin Graw<sup>1,2</sup>, Andreas Matzarakis<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Deutscher Wetterdienst, Zentrum für Medizin-Meteorologische Forschung, 79104 Freiburg im Breisgau (Deutschland)

<sup>2</sup>Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Fakultät für Umwelt und Natürliche Ressourcen, Professur für Umweltmeteorologie (Deutschland)

Die Wetterfühligkeit beschreibt Reaktionen des menschlichen Körpers auf das aktuelle Wetter und insbesondere auf rasche und markante Wetteränderungen. Der Wettereinfluss auf viele Erkrankungen ist durch epidemiologische Studien gut belegt (Zacharias, 2012). Auch wenn mit Wetterfühligkeit hauptsächlich negative Auswirkungen des Wetters auf die Gesundheit verbunden werden, hat das Wetter auch positive Einflüsse. Eine eindeutige wissenschaftliche Definition der Wetterfühligkeit existiert nicht und ist aufgrund der vielfältigen Wirkungen schwer möglich. Im deutschsprachigen Raum wird nach der auf De Rudder basierenden Einteilung zwischen Wetterreagierend, Wetterfühligkeit und Wetterempfindlichkeit unterschieden (De Rudder, 1952).

Der Körper eines jeden Menschen zeigt physiologische Reaktionen auf die vom Wetter abhängigen meteorologischen Elemente sowie Faktoren und deren Änderungen. Gesunde Menschen können die vom Wetter ausgelösten Reize so ausregulieren, dass keine spürbaren Beeinträchtigungen des physischen und mentalen Wohlbefindens eintreten. Bei Menschen mit Erkrankungen oder allgemeiner Schwächung der Regulationsfähigkeit können sich die Anpassungsvorgänge durch Befindensbeeinträchtigungen oder einer Zunahme von gesundheitlichen Beschwerden äußern. Von Wetterempfindlichkeit wird gesprochen, wenn die Gesundheit bereits durch bekannte oder auch unbekannte Vorerkrankungen beeinträchtigt ist. Das Wetter kann in diesem Fall für Verschlechterungen sorgen, ist allerdings nicht die Ursache, dass jemand krank ist. Ältere Menschen sind beispielsweise physiologisch anfälliger für extreme Hitze. Unter Wetterfühligkeit werden Beschwerden wie Mattigkeit, Müdigkeit, Unlust, Erschöpfung oder Reizbarkeit verstanden aber auch gehobene Stimmung, Lebhaftigkeit, bessere Konzentrationsfähigkeit oder Leistungssteigerung.

Wetterfühligkeit und Wetterempfindlichkeit treten vor allem in gemäßigten Breitengraden oder Klimazonen auf, da dort rasche Wetteränderungen häufig vorkommen. Da eine Abgrenzung zwischen Wetterfühligkeit und Wetterempfindlichkeit teilweise nur schwer möglich ist, wird im englischen Sprachgebrauch die zusammenfassende Bezeichnung „Atmosphere Related Syndrome“ (ARS) verwendet (DGAUM, 2008). Äquivalent dazu wird auch verbreitet von „Weathersensitivity“ gesprochen, wobei der Begriff ebenfalls meist für beide Begriffe Wetterfühligkeit und Wetterempfindlichkeit genutzt wird. Auch die Gefahrenindizes für Wetterfühlige des DWD ([www.dwd.de/biowetter](http://www.dwd.de/biowetter)) fassen unter dem Begriff Wetterfühligkeit Informationen zu Wetterfühligkeit und Wetterempfindlichkeit zusammen. Sie beinhalten Vorhersagen für verschiedene medizinische Formenkreise (Herz-Kreislauf-erkrankungen, rheumatische Erkrankungen, Atemwegserkrankungen und allgemeine Befindensbeeinträchtigungen) zu der vom aktuellen Wetter zu erwartenden Belastungen für den menschlichen Organismus. Mit Hilfe der Vorhersagen können vorsorgende Maßnahmen gezielt ergriffen und einem ungünstigen Wettereinfluss entgegengewirkt werden.

Das Wetter wirkt über die Sinne und insbesondere das vegetative Nervensystem auf den Menschen ein, da der Mensch über die Sinne und das Nervensystem ständig Reize sowohl aus der Umwelt (z.B. Lärm, Gerüche) als auch aus dem Organismus (z.B. Schmerzen) aufnimmt, diese verarbeitet und auf sie reagiert. Wird die Funktionsfähigkeit beeinträchtigt indem zu starke Reize oder schnell wechselnde Reize auftreten, kann sich dies durch physische und/ oder psychische Reaktionen äußern und damit auf das Befinden auswirken. Häufig sind Menschen mit einem bereits geschwächten Gesundheitszustand betroffen (Trenkle, 1989). In dosierter Form und in den meisten Fällen ist die Wechselhaftigkeit des Wetters jedoch keine unerwünschte Belastung, sondern eine belebende Abwechslung für den Organismus mit erwünschten Reizen (Hentschel, 1978).

In Deutschland werden seit den 1950er Jahren durch Bevölkerungsbefragungen zur Wetterfühligkeit wissenschaftlich fundierte Daten zur Prävalenz von wetterbedingten Beschwerden und Symptomen sowie zur Beeinträchtigung des Wohlbefindens gewonnen (Höppe et al., 2002). In der letzten, in Deutschland durchgeführten, repräsentativen Umfrage aus dem Jahr 2021, die das Institut für Demoskopie Allensbach im Auftrag des Deutschen Wetterdienstes durchführte, bestätigte knapp jeder Zweite der Befragten, dass das Wetter einen Einfluss auf ihre Gesundheit hat (Graw et al., 2022). Dabei wurde eine repräsentative Stichprobe von 1080 Bundesbürgern verwendet. Basierend auf der Selbsteinschätzung der Befragten war der Anteil der Frauen, die angaben von Wetterfühligkeit betroffen zu sein mit 56% höher als der Anteil der Männer mit 36%. Auch in den vorherigen Befragungen gaben jeweils mehr Frauen als Männer an wetterfühlig zu sein (Abb. 1).

Die ausgeprägtere Wetterfühligkeit von Frauen im Vergleich zu Männern ist physiologisch durch Unterschiede in der Anfälligkeit für Wetterfühligkeit begründet, aber auch durch die Tatsache, dass Frauen und Männer unterschiedliche Vorstellungen von Gesundheit haben. Während Männer Gesundheit häufig als „Abwesenheit von Krankheit“ definieren, steht bei Frauen dagegen der Aspekt des „Wohlbefindens“ im Vordergrund (Tempel et al., 2013).

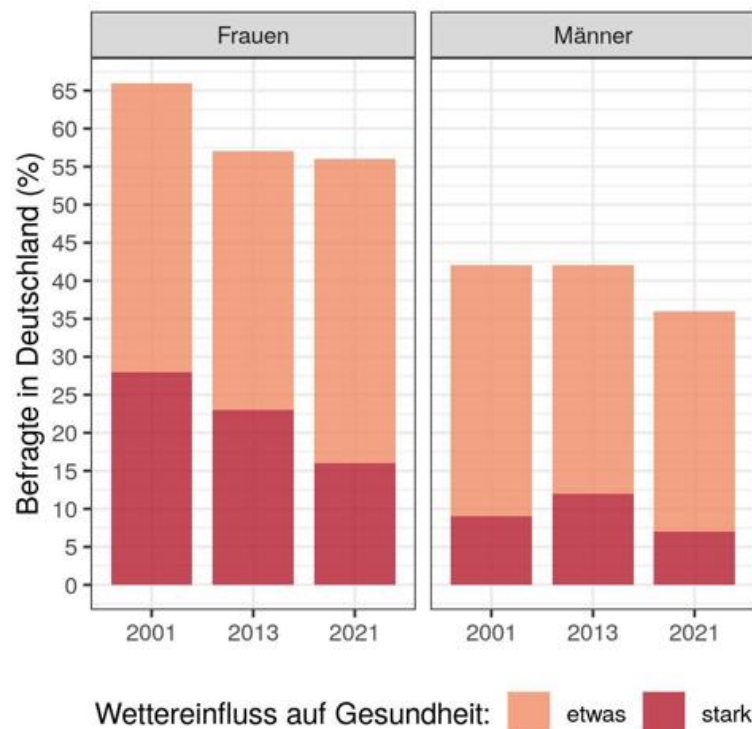


Abb. 1: Wettereinfluss auf die Gesundheit von Frauen und Männern nach repräsentativen Befragungen des Instituts für Demoskopie Allensbach aus den Jahren 2001, 2013 und 2021 (verändert nach Graw et al., 2022).

Die Entwicklung über die Jahre 2001 bis 2021 zeigt außerdem, dass sich insbesondere der starke Einfluss des Wetters auf die Gesundheit in den letzten Jahren reduziert hat. Diese Reduktion zeigt sich in der Gruppe der Frauen deutlicher als in der Gruppe der Männer. Während der Anteil der Frauen, die einen starken Einfluss des Wetters auf ihre Gesundheit bemerkten von 28% in 2001 und 23% in 2013 auf 16% in 2021 sank, lag der Anteil der Männer bei 9% in 2001 und bei 7% in 2021, wobei 2013 zwischenzeitlich ein leichter Anstieg erfolgte (Abb. 1).

Insgesamt lag während der zweiten Hälfte des 20. Jhd. der Anteil der Wetterfühligten in Deutschland bei 60% und reduzierte sich in den ersten zwei Jahrzehnten des 21. Jahrhunderts auf etwa 50% (54% im Jahr 2001, 50% im Jahr 2013 und 46% im Jahr 2021). Dieser Rückgang der Prävalenz der

Wetterfühligkeit könnte mit einem größeren Gesundheitsbewusstsein der Bevölkerung und einer verbesserten Gesundheitsvorsorge zusammenhängen sowie mit neuen Kommunikationsmöglichkeiten wie Webseiten und Smartphone Apps, die zugänglichere Informationen für betroffene Menschen bieten.

Trotz des beobachteten leichten Rückgangs der Prävalenz der Wetterfühligkeit wird die Wetterfühligkeit nicht an Bedeutung verlieren, da weiterhin ein großer Teil der Bevölkerung von Wetterfühligkeit betroffen sein wird. Das erste Auftreten von Wetterfühligkeit ist etwa gleichhäufig über alle Altersklassen verteilt. Generell leiden jedoch Ältere und chronisch kranke Menschen, die z.B. an Kreislaufstörungen oder unter chronischen Schmerzen leiden, häufiger unter Wetterfühligkeit als der Durchschnitt der Bevölkerung (Graw, 2022).

Die häufigsten Beschwerden bei Wetterfühligkeit sind Kopfschmerzen/Migräne, Abgeschlagenheit/Erschöpfung, eingeschränkte Aktivitäten und Müdigkeit (Abb. 2).

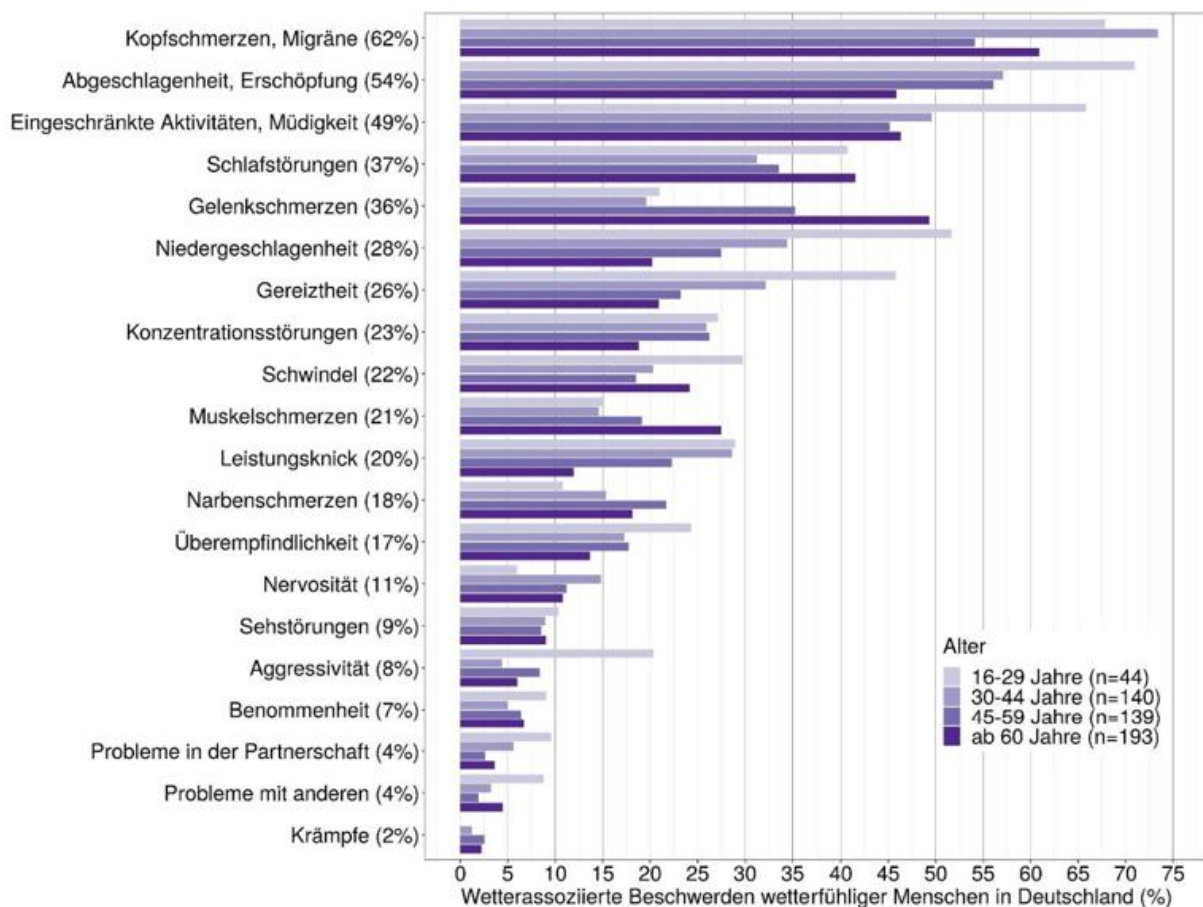


Abb. 2: Beschwerden bei Wetterfühligkeit in absteigender Häufigkeit und unterteilt nach Alter basierend auf einer Selbsteinschätzung der Befragten während einer repräsentativen Bevölkerungsbefragung des Instituts für Demoskopie Allensbach aus dem Jahr 2021. Die Nennung von mehreren Antworten war möglich (verändert nach Graw et al., 2022).

Gelenk-, Muskel- und Narbenschmerzen betreffen vor allem Ältere, während Jüngere im Vergleich zu Älteren häufiger Müdigkeit, Erschöpfung, Kopfschmerzen/Migräne, Niedergeschlagenheit, Gereiztheit, Überempfindlichkeit, Konzentrationsstörungen oder das Auftreten eines Leistungsknicks angeben (Abb. 2).

Da zukünftig durch den demografischen Wandel der Anteil älterer Menschen in der Bevölkerung steigt und die Wetterfühligkeit an das Vorhandensein chronischer Erkrankungen gekoppelt ist, ist es möglich,

dass der Anteil wetterfühligere Menschen zukünftig wieder steigt. Hinzu kommen die Veränderungen durch den anthropogenen Klimawandel mit immer häufigeren extremen Wettersituationen und damit auch starker Wettervariabilität. Vorbeugende Maßnahmen wie der Aufenthalt im Freien und die dosierte Belastung des Körpers durch unterschiedliche Wetterbedingungen sowie die Vermeidung anderer Belastungen können die Anpassungs-/Regulationsfähigkeit des Körpers an die wechselnden Wetterbedingungen trainieren bzw. abhärten und dazu beitragen, dass der Körper weniger anfällig für Wetterfühligkeit ist.

#### Literatur:

- DE RUDDER, B., 1952: Grundriss einer Meteorobiologie des Menschen. Wetter- und Jahreszeiteinflüsse. Springer-Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg.
- DGAUM (Deutsche Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin), 2008: Auswirkungen des Wetters auf die menschliche Gesundheit, Nr. 002/036. [https://www.dgaum.de/fileadmin/pdf/Leitlinien/002-036\\_S1\\_Umweltmedizinische\\_Leitlinie\\_Auswirkungen\\_des\\_Wetters\\_auf\\_die\\_menschliche\\_Gesundheit\\_11-2008\\_11-2013.pdf](https://www.dgaum.de/fileadmin/pdf/Leitlinien/002-036_S1_Umweltmedizinische_Leitlinie_Auswirkungen_des_Wetters_auf_die_menschliche_Gesundheit_11-2008_11-2013.pdf) (letzter Zugriff 15. Dez. 2023).
- GRAW, K., SOMMER, M., MATZARAKIS, A., 2022: The Prevalence of Weather Sensitivity in Germany Derived from Population Surveys. *Atmosphere* 13(11), 1-14. <https://doi.org/10.3390/atmos13111865>.
- HENTSCHEL, G., 1978: Das Bioklima des Menschen. VEB Verlag Volk und Gesundheit, Berlin.
- HÖPPE, P., VON MACKENSEN, S., NOWAK, D., PIEL, E., 2002: Prävalenz von Wetterfühligkeit in Deutschland. *DMW* 127, 15-20.
- TEMPEL, G., JUNG, F., SCHRÖDER, C., 2013: Die Gesundheit von Männern ist nicht die Gesundheit von Frauen. Gesundheitsamt Bremen—Abteilung Gesundheit und Umwelt. <https://www.roesrath.de/3-gbe-gesundheit-m-e4nner-frauen-gs.pdf> (letzter Zugriff 15. Dez. 2023).
- TREMKLE, H., 1989: Wetterfühligkeit: Vorbeugen und behandeln; Der Einfluß von Wetter und Klima auf Körper und Psyche. Falken-Verlag GmbH, Niedernhausen/ Ts.
- ZACHARIAS, S., 2012: Literaturstudie zum Einfluss des Wetters auf die menschliche Gesundheit. DWD/ZMMF/UBA, Forschungskennzahl 3711 61 238. [https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Pool/Forschungsdatenbank/fkz\\_3711\\_61\\_238\\_klimawandel\\_einfluss\\_bevoelkerung\\_anlage\\_1\\_bf.pdf](https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Forschungsdatenbank/fkz_3711_61_238_klimawandel_einfluss_bevoelkerung_anlage_1_bf.pdf) (letzter Zugriff 15. Dez. 2023).

**Schlüsselwörter:** Wetterfühligkeit, Prävalenz, Repräsentative Bevölkerungsbefragung, chronische Erkrankungen, Deutschland

## Decomposition of future changes in UTCI using regional climate projections for German cities

*Dante T. Castro Garro*<sup>1</sup>, *Peter Hoffmann*<sup>1</sup>, *Christine Nam*, *Lars Buntemeyer*<sup>1</sup>, *Ludwig Lierhammer*<sup>1</sup>, *Jana Sillmann*<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Climate Service Center Germany (GERICS), Helmholtz-Zentrum Hereon, Hamburg (Germany)

<sup>2</sup>Center for Earth System Research and Sustainability (CEN), University of Hamburg, Hamburg (Germany)

The escalation of heat waves in Europe due to climate change has raised significant concern, given the potential rise in the frequency, intensity, and duration of such events (Russo et al., 2015). This shift is linked to an increased risk of heat-related health issues, mainly seen in the rise of morbidity and mortality (Mitchell et al., 2016). However, heat-related risks are not only determined by extreme temperatures, but are also influenced by intricate interactions with other environmental variables (e.g. humidity, radiation, and wind). Consequently, diverse environmental configurations may yield similar heat-related risk, a nuanced aspect often overlooked.

In response to this context, the UTCI was proposed as a comprehensive metric for evaluating human thermal comfort, striving for a more accurate representation of the human body's response to its surroundings (Jendritzky et al., 2012; Blazejczyk et al., 2012). UTCI has already been analyzed in future climate projections, revealing that heat stress events (like heat waves) increase significantly (Brecht et al., 2020; Nam et al., 2023). Still, an essential knowledge gap in terms of the specific contributions of different biometeorological variables contributing to the projected UTCI-based heat stress increase has not yet been addressed. Improving our understanding in this regard is crucial, particularly during heat waves, where low wind speeds and high radiation levels impose restrictions on the UTCI calculation, consequently affecting human thermal comfort.

This study aims to explore in depth the behavior and limitations of near-future (2031-2050) and far-future (2070-2099) UTCI projections in multiple cities across Germany. The analysis centers on the meteorological components of UTCI under extreme heat conditions. The projected data will be obtained from an ensemble of EURO-CORDEX projections based on the RCP8.5 scenario (Nam et al., 2023). Furthermore, the significance and robustness of the projected changes in the individual variables will be addressed by taking advantage of the ensemble dataset (Brecht et al., 2020). The findings of the study will contribute to a more comprehensive understanding of evolving heat stress and inform future climate adaptation strategies in the face of increasing heat-related risks.

### References:

- RUSSO, S., et al. 2015: Top ten European heatwaves since 1950 and their occurrence in the coming decades, *Environ Res Lett.* **10**, 124003.
- MITCHELL et al. 2016: Attributing human mortality during extreme heat waves to anthropogenic climate change, *Environ Res Lett.* **11**, 074006
- JENDRITZKY, G., et al. 2012, UTCI-Why another thermal index?, *Int J Biometeorol.* **56**, 421
- BLAZEJCZYK, Y. et al., 2012: Comparison of UTCI to selected thermal indices, *Int J Biometeorol.* **56**, 515
- BRECHT M., et al. 2020, UTCI climatology and its future change in Germany-an RCM ensemble approach, *Meteorologische Zeitschrift* Vol. **29**, 97
- NAM C. et al. 2023, *Changes in universal thermal climate index from regional climate model projections over European beaches*

## Frühsommer-Meningoenzephalitis (FSME) im Großraum der Alpen: Steigende Fallzahlen zufolge Klimawandel, Klimaanpassung und geändertem Freizeitverhalten

*Franz Rubel*

Climate Change and Infectious Diseases Group, Veterinärmedizinische Universität Wien, Veterinärplatz 1, 1210 Wien (Österreich)

Die Frühsommer-Meningoenzephalitis (FSME) ist eine virale Infektionskrankheit, die sich durch eine akute Entzündung des Nervensystems manifestiert. Nach einer Inkubationszeit von 1-4 Wochen entwickeln 50% der Patienten eine isolierte Hirnhautentzündung (Meningitis), 40% eine Hirn- und Hirnhautentzündung (Meningoenzephalitis) und 10% zusätzlich eine Rückenmarksentzündung (Meningoenzephalomyelitis). In ungefähr 1% der Fälle endet die Krankheit tödlich. Übertragen wird das FSME-Virus durch Zecken wie den Gemeinen Holzbock (*Ixodes ricinus*) und die Auwaldzecke (*Dermacentor reticulatus*), die im Großraum der Alpen weitverbreitet sind (Rubel et al., 2021b). Seltener ist die sogenannte alimentäre Übertragung, die immer wieder zu lokalen Krankheitsausbrüchen führt und durch den Verzehr unpasteurisierter Milchprodukte erfolgt. Diese Rohmilchprodukte werden zumeist von Selbstversorgern oder auf Almen in Form von Milch oder Käse konsumiert (Rubel & Schiffner-Rohe, 2019). Mehr als 90% der Infektionen erfolgen während der Freizeit. Die FSME ist aber auch eine typische Berufserkrankung von Land- und Forstwirten. Das FSME-Verbreitungsgebiet im Großraum der Alpen liegt im immer-feuchten, warm-gemäßigtem Klima (Cfb) der Niederungen - auch als Buchenwaldklima bezeichnet - und im borealen Misch- und Nadelwaldklima (Dfb) der Mittelgebirge (Rubel et al., 2017).

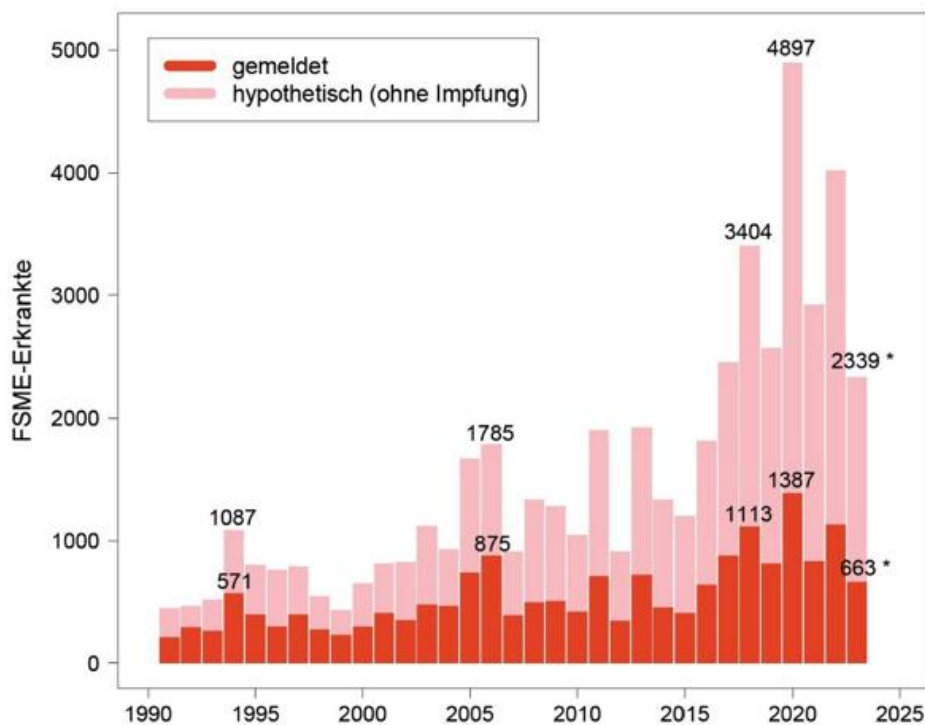


Abb. 1: FSME-Fallzahlen im Großraum der Alpen (DACH Länder). Gemeldete FSME-Fälle (rot) vs. hypothetisch ohne Impfung anzunehmende FSME-Fälle (rosa). Die extrem hohe Zahl an FSME-Erkrankungen im Pandemie-Jahr 2020 ist auch auf das geänderte Freizeitverhalten zurückzuführen (Rubel, 2022). Die Fallzahlen von 2023 sind noch nicht komplett (\* Stand: Sept. 2023).

Seit den 1970er Jahren existieren hochwirksame Impfstoffe und je nach Land ist ein mehr oder weniger großer Anteil der Bevölkerung durch FSME-Impfungen geschützt. Da das FSME-Virus aber in einem natürlichen Übertragungszyklus zwischen kleinen Nagetieren (Mäusen) und Zecken persistiert, kann es nicht ausgerottet werden. Die Impfung bewirkt zwar einen Individualschutz, die Bevölkerung kann aber keine Herdenimmunität (wie zum Beispiel bei COVID19) entwickeln.

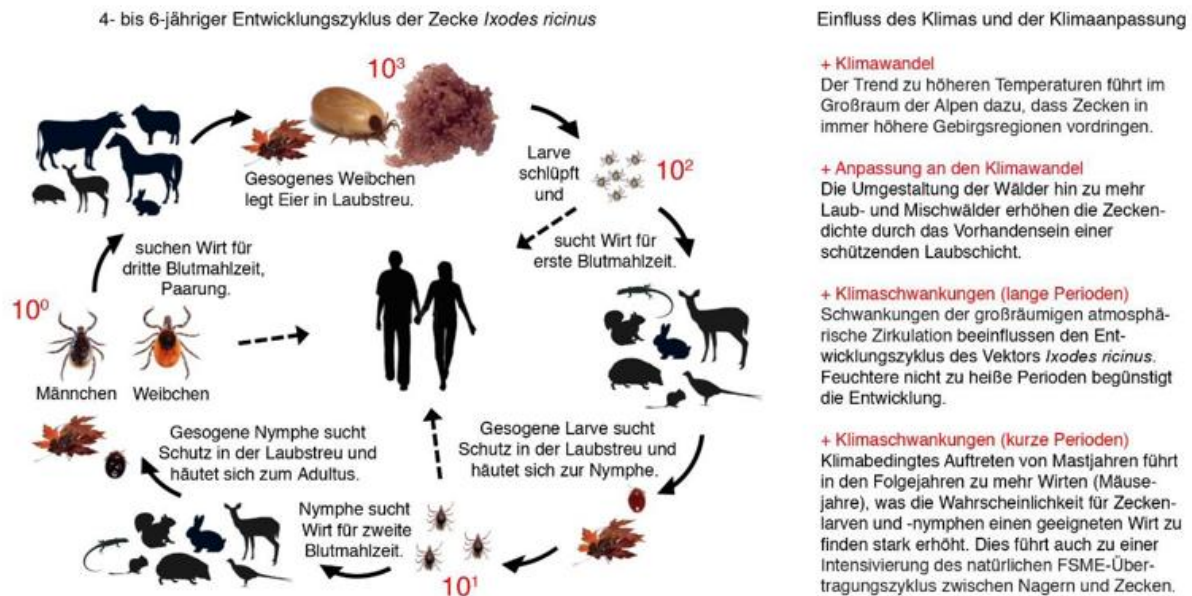


Abb. 2: Entwicklungszyklus des wichtigsten FSME-Vektors, der Zecke *Ixodes ricinus* (Rubel & Schiffner-Rohe, 2019) unter dem Einfluss von Klimawandel und Klimaschwankungen. Der Entwicklungszyklus vom Ei (eine weibliche Zecke legt ungefähr  $10^3 = 1000$  Eier) über die Larve ( $10^2$ ), die Nympe ( $10^1$ ) bis zur adulten Zecke ( $10^0$ ) dauert 4-6 Jahre und bedingt Blutmahlzeiten von drei Wirten. Der Klimawandel, Strategien zur Klimaanpassung und Klimaschwankungen beeinflussen den Entwicklungszyklus und damit die Verbreitung und Abundanz von Zecken. Deutlich mehr Aufenthalte im Freien während der COVID19-Pandemie erhöhte die Exposition der Bevölkerung im Jahr 2020.

Die steigenden FSME-Fallzahlen im Großraum der Alpen der Periode 1991-2023 sind in Abbildung 1 dargestellt. Die gemeldeten FSME-Fälle steigen von 209 Erkrankten im Jahr 1991 auf den bisherigen Höhepunkt von 1387 Erkrankte im Jahr 2020 an. Dies sind die Summen der offiziellen Zahlen, die für Deutschland (vorwiegend Bayern und Baden-Württemberg), Österreich und die Schweiz (DACH-Länder) veröffentlicht wurden. Berücksichtigt man die teilweise hohe Durchimpfung der Bevölkerung von aktuell 37% in Deutschland, 79% in Österreich und 75% in der Schweiz, dann kann man die hypothetischen FSME-Fallzahlen hochrechnen, die in einer vollständig empfänglichen (nicht geimpften) Bevölkerung aufgetreten wären. Im Jahr mit den bisher meisten FSME-Fällen, dem Jahr 2020, wären demnach ohne FSME-Schutzimpfung 4646 FSME-Erkrankten zu erwarten gewesen. Der große Nutzen der FSME-Impfung kann aus der Differenz zu den tatsächlich gemeldeten 1387 Erkrankten abgeleitet werden.

Dass die Abfolge der jährlichen FSME-Fälle keineswegs zufällig ist haben Rubel et al. (2020a) gezeigt. Demnach kann der 12-jährige Zyklus mit den Maxima in 1994, 2006 und 2018 (Abb. 1) durch die großräumige atmosphärische Zirkulation erklärt werden. Dazu können *Teleconnection*-Indizes wie NAO oder besser SCAND verwendet werden. Der SCAND beschreibt ein atmosphärisches Zirkulationszentrum über Skandinavien, mit schwächeren Zentren entgegengesetzten Vorzeichens über Westeuropa und Ostrussland/Westmongolei. Er ist somit repräsentativ für das FSME-Verbreitungsgebiet, das sich in Europa von den Westalpen und Skandinavien bis nach Russland erstreckt. Positive Werte werden mit unterdurchschnittlichen Temperaturen in Westeuropa und Zentralrussland in

Verbindung gebracht. Dazu kommen überdurchschnittliche Niederschläge in Mittel- und Südeuropa und unterdurchschnittliche Niederschläge in Skandinavien. Für die FSME-Endemiegebiete im Alpenraum bedeuten somit hohe SCAND-Werte unterdurchschnittlich warme und niederschlagsreichere Perioden. Niedrige SCAND-Werte hingegen beschreiben überdurchschnittlich warme und trockene Perioden. Andere Maxima in der FSME-Zeitreihe (Abb. 1) sind auf die zwei Jahre zuvor beobachteten Mastjahre zurückzuführen. Besonders Buchenmastjahre begünstigen im Jahr darauf die Entwicklung der Nagerpopulationen (Mäusejahre), was zu höheren Dichten von Zeckenlarven führt.

Diese entwickeln sich im zweiten Jahr nach einem Mastjahr zu Nymphen, welche dann bevorzugt größere Säugetiere und Menschen befallen. Letztere werden damit auch häufiger mit dem FSME-Virus infiziert. Siehe dazu auch den Entwicklungszyklus des wichtigsten FSME-Vektors, der Zecke *Ixodes ricinus* (Abb. 2). Die Buchenmastjahre 2009, 2011, 2018 und 2020 zeigen deutlich erhöhte FSME-Fallzahlen in den Jahren 2011, 2013, 2020 und 2022. Somit ist der Höchstwert von 1387 FSME-Fällen im Jahr 2020 auf das Zusammentreffen des Effektes eines Mastjahres mit dem geänderten Freizeitverhalten während der COVID19-Pandemie (dreimal mehr gezählte Menschen in den Naherholungsgebieten der Großstädte) zurückzuführen (Abb. 1). Höhere FSME-Fallzahlen haben ihre Ursache auch in steigenden Bevölkerungszahlen, bedingt durch Migration und einer in Deutschland und Österreich leicht rückgängigen Durchimpfung der Bevölkerung. Der Trend zu häufigeren FSME-Erkrankungen wird auch verstärkt durch die Umgestaltung der Wälder als Maßnahme zur Anpassung an den Klimawandel. Mehr Laub- und Mischwälder verbessern die Lebensbedingungen von Zecken und werden die FSME-Fallzahlen auch in Zukunft ansteigen lassen (Rubel, 2022).

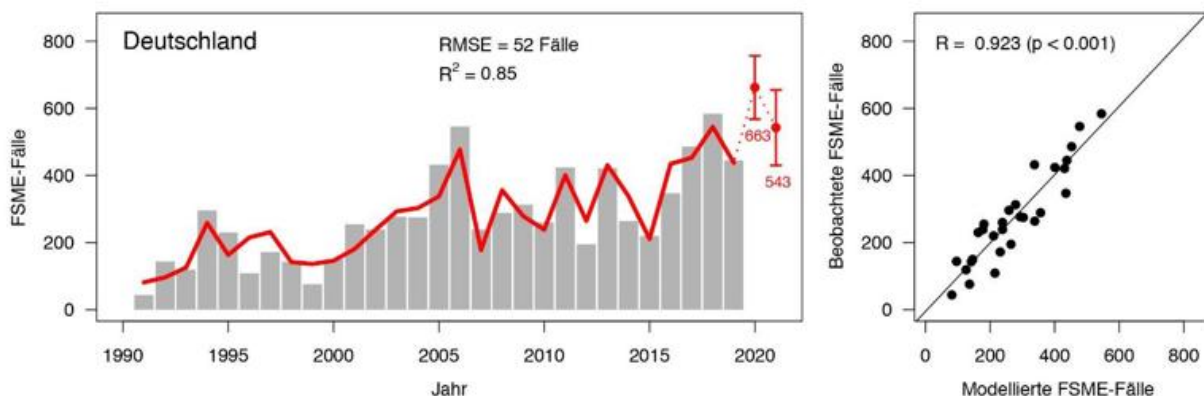


Abb. 3: Beobachtete (graue Balken) und modellierte (rote Linie) FSME-Fälle in Deutschland korrelieren in der Kalibrierungs-Periode 1991-2019 mit  $R=0.923$  (RMSE=52 Fälle). Für die Jahre 2020 und 2021 wurden 663 und 543 FSME-Fälle vorhergesagt (Rubel & Brugger, 2021a).

Basierend auf den oben ausgeführten Zusammenhängen zwischen Klima, Zecken und FSME haben Rubel & Brugger (2020b) ein statistisches Modell zur Vorhersage von FSME-Fällen der nächsten zwei Jahre entwickelt. Abbildung 3 zeigt die Deutschland-Vorhersage für die Jahre 2020 und 2021 basierend auf den Eingangsdaten von 1991-2019 (erstellt Anfang 2020, siehe Rubel & Brugger, 2021a). Demnach wurden  $663 \pm 95$  FSME-Fälle für 2020 und  $543 \pm 112$  FSME-Fälle für 2021 vorhergesagt. Die beobachteten FSME-Fälle aus der Datenbank des Robert Koch-Instituts (RKI) liegen jeweils im Frühjahr des Folgejahres vor. In Deutschland wurden 717 FSME-Fälle für 2020 und 420 FSME-Fälle für 2021 gemeldet. Die Verifikation mit unabhängigen Daten zeigt, dass die Vorhersage für das nächste Jahr 2020 um 54 Fälle zu gering war, was aber innerhalb der angegebenen Schwankungsbreite von  $663 \pm 95$  liegt. Die Vorhersage für das übernächste Jahr 2021 lag um 123 Fälle zu hoch, und somit außerhalb der Schwankungsbreite von  $543 \pm 112$  Fällen. Eine detaillierte Verifikation des FSME-Modells für die Länder Deutschland, Österreich und Schweiz über den Zeitraum der letzten fünf Jahre belegt die allgemeine Zuverlässigkeit der Vorhersagen, auch wenn die diskutierte Vorhersage für 2021 aus dem Rahmen fällt. Aktuelle Vorhersagen und Verifikationsergebnisse werden auf der Tagung präsentiert.

#### Literatur:

- RUBEL, F., BRUGGER, K., HASLINGER, K., AUER, I., 2017: The climate of the European Alps: Shift of very high resolution Köppen-Geiger climate zones 1800–2100. *Meteorol Z* **26**, 115-125.  
<https://doi.org/10.1127/metz/2016/0816>
- RUBEL, F., SCHIFFNER-ROHE, J. (Hrsg.), 2019: FSME in Deutschland - Stand der Wissenschaft. Deutscher Wissenschafts-Verlag (DWV) Baden-Baden, 267pp.
- RUBEL, F., WALTER, M., VOGELGESANG, J. R., BRUGGER, K., 2020a: Tick-borne encephalitis (TBE) cases are not random: explaining trend, low- and high-frequency oscillations based on the Austrian TBE time series. *BMC Infect Dis* **20**:448.  
<https://doi.org/10.1186/s12879-020-05156-7>
- RUBEL, F., BRUGGER, K., 2020b: Tick-borne encephalitis incidence forecasts for Austria, Germany, and Switzerland. *Ticks Tick Borne Dis* **11**:101437.  
<https://doi.org/10.1016/j.ttbdis.2020.101437>
- RUBEL, F., BRUGGER, K., 2021a: Operational TBE incidence forecasts for Austria, Germany, and Switzerland 2019-2021. *Ticks Tick Borne Dis* **12**:101579.  
<https://doi.org/10.1016/j.ttbdis.2020.101579>
- RUBEL, F., BRUGGER, K., CHITIMIA-DOBLER, L., *et al.*, 2021b: Atlas of ticks (Acari: Argasidae, Ixodidae) in Germany. *Exp Appl Acarol* **84**:183-214.  
<https://doi.org/10.1007/s10493-021-00619-1>
- RUBEL, F., 2022: Climate change and tick-borne encephalitis in the Greater Alpine Region. In: Nuttall, P. (Ed.): *Climate, Ticks and Disease*. CAB International, UK, 354-359.  
<https://doi.org/10.1079/9781789249637.0050>

**Schlüsselwörter:** SCAND-Index, Buchenmast, COVID19, Zecken, Infektionskrankheit

## Mikroskalige Ausbreitungsrechnungen zur Untersuchung des Ausbreitungsverhaltens von Schiffsabgasfahnen mit dem Modell PALM

*Katrin F. Gehrke<sup>1</sup>, Matthias Sühling<sup>1,2</sup>, Helge Knoop<sup>1</sup>, Patrick Wagner<sup>3</sup>, Svenja Sommer<sup>3</sup>, Philip Eger<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>pecanode GmbH, Hannover (Deutschland)

<sup>2</sup>Leibniz Universität Hannover (Deutschland)

<sup>3</sup>Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz (Deutschland)

### Hintergrund

Der Beitrag der Binnenschifffahrt zur Luftschadstoffbelastung in bewohnten oder von Menschen frequentierten Gebieten ist momentan nicht vollständig quantifiziert. Ziel des Vorhabens ist, durch mikroskalige Modellierung der atmosphärischen Grenzschicht den Beitrag von Schiffsemissionen zur Luftschadstoffbelastung im Uferbereich von Wasserstraßen bei verschiedenen atmosphärischen Bedingungen zu ermitteln, sowie ein besseres Verständnis der Dispersionseigenschaften bei schifffahrtsbedingten Emissionen zu erlangen. Eine realitätsnahe Simulation der Schadstoffausbreitung soll mit dem mikroskaligen Large-eddy Simulations (LES)-Modell PALM durchgeführt werden (Maronga et al., 2015), wodurch räumlich und zeitlich hochaufgelöst verschiedene Ausbreitungszustände betrachtet werden können. Zudem können mit Hilfe von PALM nicht nur mittlere Konzentrationen, sondern auch jeweilige Konzentrationsspitzen sowie deren Dauer an einzelnen Immissionsorten ermittelt werden. Diese zeitlich und räumlich hochaufgelösten Simulationsdaten können statistisch belastbar ausgewertet und anschließend mit Messdaten der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) verglichen werden.

### Modellsetup

PALM ist ein LES-Modell zur Simulation von atmosphärischen Grenzschichtströmungen, welches die energietragenden Wirbel in der Grenzschicht explizit auf dem numerischen Gitter auflöst und die kleineren Wirbel parametrisiert. Zusätzlich zum dynamischen Modellkern umfasst PALM eine Reihe an gekoppelten Modellkomponenten, welche essenziell für die Simulation von atmosphärischen Strömungen in komplexem Gelände sind. Dazu gehört ein gekoppeltes Landoberflächen-Bodenmodell (Gehrke et al., 2021) und ein gekoppeltes Fassaden-Gebäudemodell (Resler et al., 2017), ein Strahlungstransfermodell (Krc et al., 2021), um Abschattungen und Reflexionen zu berücksichtigen, sowie ein Pflanzenmodell (Maronga et al., 2015). Zur Untersuchung des Einflusses von Schiffsemissionen auf die Luftqualität an nahegelegenen Uferbereichen wurde die Möglichkeit geschaffen, zeitabhängige, nichtstationäre Punkt- sowie linienartige Volumenquellen verschiedener chemischer Spezies in PALM zu verarbeiten. Die Emissionen wurden dabei definiert über deren absolute Zeit, Geokoordinaten der Quelle in UTM, sowie die dazugehörigen Emissionsraten in g/s. Um nur die reine turbulente und advective Ausbreitung der emittierten Stoffe zu untersuchen, wurde die Deposition ausgeschaltet und es wurde keine Interaktion mit der Luftfeuchte berücksichtigt.

Das Untersuchungsgebiet umfasst einen 2,5 km langen Rheinabschnitt bei Worms. Das Modell-Setup besteht aus einem äußersten Parent-Gebiet (20 m Gitterweite) und zwei konsekutiv ineinander genesteten Child-Gebieten (8 m und 2 m Gitterweite). Die Lage der Modellgebiete ist in Abbildung 1 dargestellt. Die statische Eingabedatei für das Simulationssetup beinhaltet 3D Informationen der Gebäude und Brücken, sowie die relevanten Landoberflächentypen. Der turbulente Antrieb für das Parent-Gebiet wurden mittels eines zyklischen Vorlaufs erstellt.

Die für einen Vergleich mit Messdaten ausgewählte Referenzsimulation repräsentiert die atmosphärischen Bedingungen um den 20. April 2022 in den frühen Nachmittagsstunden und wurde mit den aus Radiosondendaten abgeleiteten atmosphärischen Temperatur-, Feuchte-, und Windprofilen initialisiert. Der Wind wehte dabei aus Nord-Ost mit einer mittleren Windgeschwindigkeit um die 4 m/s an der Uferstation. Die Temperatur des Rheins betrug während des Zeitraums 288 K. Es wurde eine Lufttemperatur gemäß den atmosphärischen Bedingungen in den frühen Nachmittagsstunden um den 20. April 2022 vorgegeben. Sie verändert sich jedoch aufgrund der Erwärmung der Grenzschicht durch

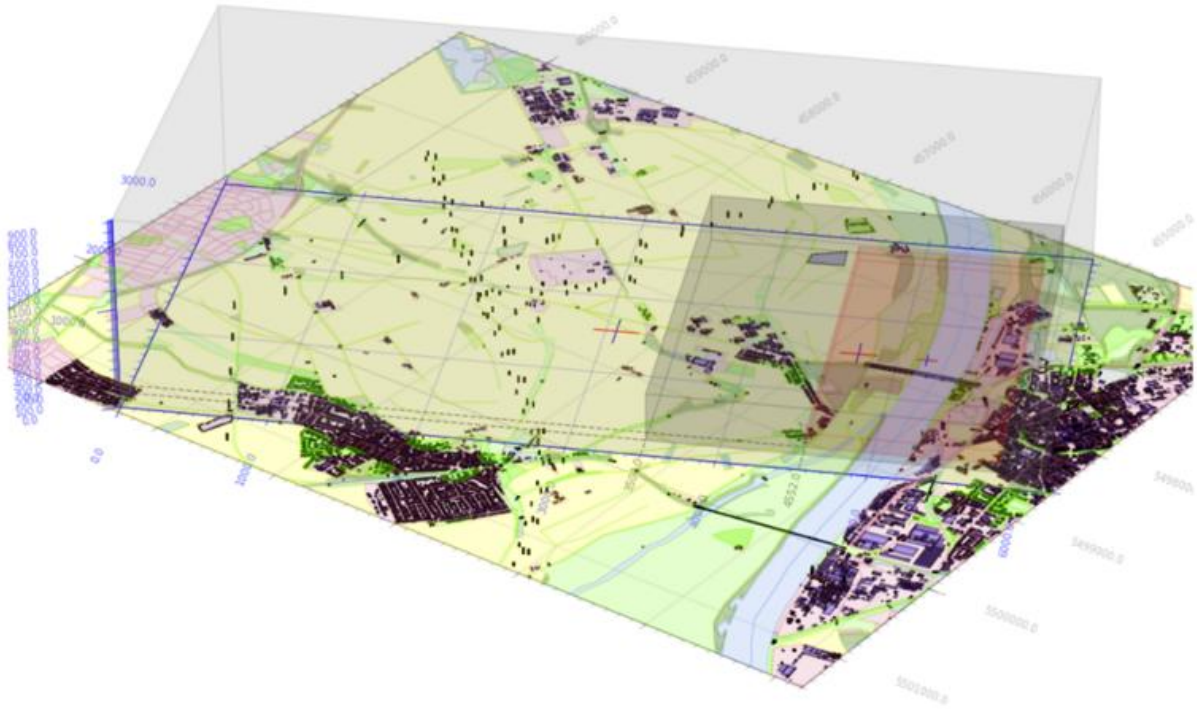


Abb. 1: Lage und Abmessungen der ineinander genesteten PALM-Modellgebiete sowie der dazugehörigen Landnutzung. Die Nibelungenbrücke ist als schwarzer Balken in dem roten Modellgebiet zu erkennen.

Einstrahlung und Einmischprozesse am Oberrand der Grenzschicht während der Simulation leicht, so dass sich die Temperaturdifferenz zwischen Atmosphäre und Wasser erst in der Simulation einstellt. Letztlich beträgt die Temperaturdifferenz zwischen Atmosphäre und Wasser etwa minus 1-2 K während der Simulation, was zu einer leichten Labilisierung bei der Überströmung des Rheins führt. Es wurde eine konvektive Situation im Zeitraum von 12:00 - 16:00 Uhr simuliert, unter der Annahme eines wolkenfreien Strahlungstages. In einer Parameterstudie wurden zudem die Windrichtung, die atmosphärische Stabilität und die Temperaturdifferenz zwischen der Atmosphäre und der Wasseroberfläche variiert.

In Abbildung 2 ist das Strömungsfeld sowie die potentielle Temperatur in Strömungsrichtung (quer zum Rhein) auf Höhe der Ufermessstation (rotes Dreieck) dargestellt. Im Luv des Rheins ist ein mittleres Aufsteigen zu beobachten, bedingt durch die dortigen Waldflächen, bzw. Baumreihen, die ein Strömungshindernis darstellen. Im Bereich der dortigen Bäume ist die potentielle Temperatur erhöht, was auf die Erwärmung des Kronenraumes und dem ineffektiven turbulenten Transport im Kronenraum zurückzuführen ist. Auf Höhe der Ufermessstation ist über dem Rhein ein mittleres Absinken zu beobachten, was durch die Rezirkulation im Lee der Waldflächen und Baumreihen, sowie die niedrigeren Geländehöhe des Rheins bedingt ist. Am rechten Rheinufer ist, aufgrund der Geländeunterschiede, eine positive Vertikalgeschwindigkeit zu beobachten.

### Analyse

Abbildung 3 zeigt eine 3D-Ansicht der instantanen Schadstoffkonzentration eines Schiffs mit mehreren aufeinanderfolgenden Durchfahrten. Die Abgasfahnen der jeweiligen Schiffe zeigen ein typisches Verhalten, mit einer zunehmenden Verbreiterung der Abgasfahne mit zunehmender Distanz zur Quelle und einer damit einhergehenden Verringerung der Konzentration, sowie dem typischen Regimewechsel zwischen quellnahem Mäandrieren und zunehmender relativer Dispersion (Cassiani et al., 2020). Dieses für die atmosphärische Grenzschicht typische Dispersionsverhalten wird gestört, sobald die Abgasfahne den Uferbereich erreicht. Aufgrund der dortigen Geländeunterschiede, der Gebäude und Bäume, entstehen komplexe Zirkulationsmuster, die zu einer signifikanten Verbreiterung der Abgasfahne führen. Dies ist beispielsweise in der Abgasfahne am oberen rechten Bildrand in Abbildung 3 gut erkennbar, bei dem sich die Abgasfahne im Bereich der Uferlinie horizontal sowie vertikal aufweitet.

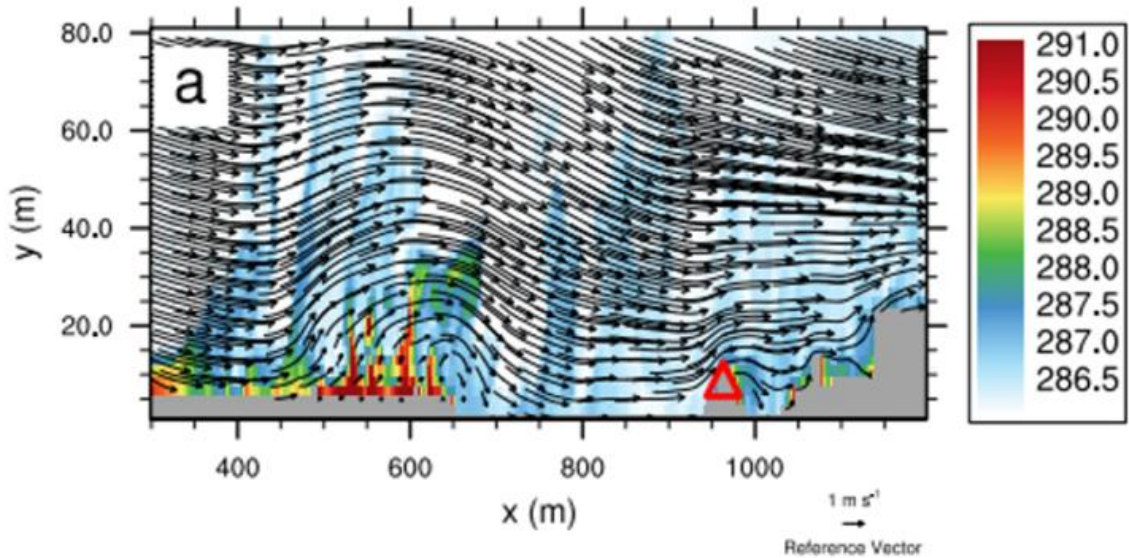


Abb. 2: Vertikalschnitt der potentiellen Temperatur und Stromlinien des Windvektors in einem Ausschnitt des hochaufgelösten Modellgebiets.



Abb. 3: 3D-Ansicht der instantanen Schadstoffkonzentration eines Schiffs mit drei Durchfahrten.

Abbildung 4 zeigt Zeitreihen der gemessenen Konzentration an den Messstandorten M, L, K und H, welche einen zunehmenden Abstand zum Ufer aufweisen. Die Messstation M befindet sich direkt am Ufer und zeigt klar ausgeprägte, regelmäßige Peaks der Konzentration, tendenziell mit einem steilen Anstieg und einem relativ dazu flacheren Auslaufen der hohen Konzentrationswerte. Station L (Spielplatz Kastanienallee) zeigt zeitlich versetzt zu Station M ähnlich hohe Konzentrationsspitzen auf, welche jedoch länger andauern. Die ist darauf zurückzuführen, dass Station L von Bäumen umgeben und somit schlechter ventilert ist im Vergleich zu Station M. Station K (Freifläche Festplatz) weist im Vergleich zu Station M und L wesentlich geringere Konzentrationsspitzen auf, was auf die zunehmende

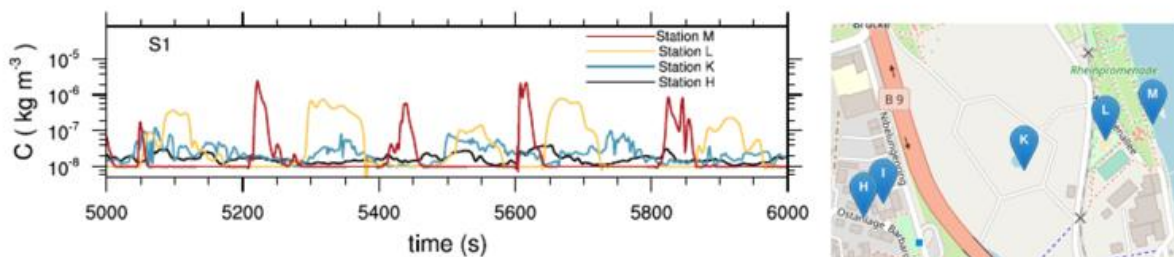


Abb. 4: Links: Zeitreihen der virtuell gemessenen Schadstoffimmissionen eines Schiffs mit mehreren Durchfahrten für einen willkürlich ausgewählten Zeitraum von 1000s. Rechts: Lage der virtuellen Messstationen in 3 m Höhe. (Karte: <http://www.geoplaner.de>)

turbulente Durchmischung mit zunehmender Entfernung und Gebäude- bzw. Pflanzen-induzierte Turbulenz stromaufwärts zurückzuführen ist. Die Konzentration nähert sich nach einem Peak einer mittleren Konzentration - höher der initial gesetzten Hintergrundkonzentration - an, mit dazu positiven und negativen Abweichungen. Weiter stromabwärts bei Station H (Ostanlage) verringert sich die Konzentration zunehmend weiter und es sind kaum noch einzelne Konzentrationsspitzen zu erkennen, sondern eine zunehmende Mittelkonzentration dadurch, dass sich aufgrund der längeren Verweildauer die einzelnen Abgasfahnen der aufeinanderfolgenden Durchfahrten desselben Schiffs zunehmend überlagern.

#### **Fazit**

Mikroskalige Modellierung der atmosphärischen Grenzschicht tragen zu einem besseren Verständnis der Dispersionseigenschaften von Schiffsabgasfahnen im Uferbereich von Wasserstraßen bei. Dabei werden komplexe Strömungsmuster über Orographie, 3D-Gebäude und Brücken sowie thermische Effekte durch die unterschiedliche Landnutzung und deren Einfluss auf den Schadstofftransport berücksichtigt. Solche hochaufgelösten Simulationen von Einzelereignissen eignen sich, um eine gefühlte Diskrepanz zwischen der subjektiven Wahrnehmung einer Schadstoffbelastung und der tatsächlichen mittleren Belastung aufzulösen. Zudem können LES-Simulationen sinnvoll Konzentrationsmessungen im Einflussgebiet von Schiffsabgasfahnen ergänzen, um beispielsweise zeitabhängigen Größen wie Spitzenkonzentrationen, Schwankungsbreiten und Verweildauern abzuleiten und darüber die beobachteten Immissionen einzuordnen.

#### **Literatur:**

- CASSIANI, M., BERTAGNI M, M. MARRO, P. SALIZZONI 2020: Concentration Fluctuations from Localized Atmospheric Releases. *Boundary-Layer Meteorol.* **177**, 461-510
- GERHKE, K.F., M. SÜHRING, and Maronga B., 2021: Modeling of land-surface interactions in the PALM model system 6.0: land surface model description, first evaluation, and sensitivity to model parameters. *Geosci. Model Dev.* **14**, 5307–5329
- Krč, P., J. RESLER M. SÜHRING S. SCHUBERT, M.H. SALIM, and V. FUKA 2021: Radiative Transfer Model 3.0 integrated into the PALM model system 6.0. *Geosci. Model Dev.* **14**, 3095–3120
- MARONGA, B., M. GRYSCHKA, R. HEINZE, F. HOFFMANN, F. KANANI-SÜHRING M. KECK, K. KETELSEN, M. O. LETZEL M. SÜHRING, and S. RAASCH 2015: The Parallelized Large-Eddy Simulation Model (PALM) version 4.0 for Atmospheric and Oceanic Flows: Model Formulation, Recent Developments, and Future Perspectives. *Geosci. Model Dev.* **8**, 2515-2551
- MARONGA, B., S. BANZHAF C. BURMEISTER, T. ESCH, R. FORKEL, D. FRÖHLICH, V. FUKA K.F. GEHRKE, J. GELETIČ, S. GIERSCH, T. GRONEMEIER G. GROß, W. HELDENS A. HELLSTEN F. HOFFMANN, A. INAGAKI, E. KADASCH F. KANANI-SÜHRING, K. KETELSEN, B. A. KHAN, C. KNIGGE H. KNOOP, P. Krč, M. KURPPA, H. MAAMARI A. MATZARAKIS, M. MAUDER, M. PALLASCH, D. PAVLIK J. PFAFFEROT, J. RESLER S. RISSMANN, E. RUSSO, M. SALIM, M. REMPF J. SCHWENKEL, G. SECKMEYER, S. SCHUBERTt, M. SÜHRING R., VON TILS, L. VOLLMER S. WARD B. WITHA, H. WURPS, J. ZEIDLER, and S. RAASCH 2020: Overview of the PALM model system 6.0, *Geosci. Model Dev.* **13**, 1335-1372
- RESLER, J., P. Krč, M. BELDA P. JURUŠ, N. BENEŠOVÁ, J. LOPATA O. VLČEK, D. DAMAŠKOVÁ, K. EBEN P. DERBEK, B. MARONGA, and F. KANANI-SÜHRING 2017: PALM-USM v1.0: A new urban surface model integrated into the PALM large-eddy simulation model. *Geosci. Model Dev.* **10**, 3635–3659

**Schlüsselwörter:** Schadstoffausbreitung, bewegte Emissionen, mikroskalige numerische Simulationen, PALM-Modell

## 4.2 Poster

### Projekt „KlimaGesund Baden-Württemberg“

*Svenja Ludwig*

Deutscher Wetterdienst, Freiburg (Deutschland)

Der Klimawandel wird auch in Baden-Württemberg mit klimatischen Veränderungen einhergehen, so werden unter anderem Hitzebelastungen zunehmen und Kältereize abnehmen. Dies wird auch Auswirkungen auf die Kurorte haben. Zurzeit werden die zukünftigen Klimabedingungen noch nicht im Verfahren der Prädikatisierung von Heilbädern, Kur- und Erholungsorten berücksichtigt. Für den Erhalt der Prädikate und die Gewährleistung der Erholungsfunktion vor Ort sind somit Anpassungsmaßnahmen notwendig, welche in diesem Projekt im Fokus stehen.

Die Tourismusklimatologie verwendet für die Analyse eines lokalen Klimas meteorologische Daten wie Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und Niederschlag. Um das Bioklima, also das subjektiv vom Menschen empfundene und durch klimatische Bedingungen und Faktoren des menschlichen Körpers beeinflusste Wohlbefinden zu quantifizieren, wurden verschiedene thermische Indizes wie die Gefühlte Temperatur (GT) entwickelt. Mithilfe dieser Indizes kann das Bioklima abgebildet werden. Durch die Verwendung von Häufigkeitsklassen in der Berechnung können Aussagen über geeignete Zeiträume für einen Aufenthalt im Kurort oder Heilbad getroffen werden.

Ein guter Überblick über die das Bioklima bzw. Tourismusklima beeinflussenden Faktoren (thermisch, physikalisch, ästhetisch) kann im Klima-Tourismus/Transfer-Informationen-Schema (CTIS) dargestellt werden. Kriterien wie thermischer Komfort, Hitzestress oder Regentage werden pro Monatsdekaden, also jeweils drei ca. 10-tägige Zeiträume pro Monat, dargestellt. Mithilfe der Eignungsrate werden die Wahrscheinlichkeiten in ungeeignete bis ideale Bedingungen unterteilt. Beispielsweise ist das Auftreten von Kältereizen im Winter positiv zu bewerten, da diese für verschiedene Therapieformen eingesetzt werden können. Hitzestress im Sommer ist dagegen nicht als ideal einzustufen.

Momentan gibt es 361 Prädikate in Baden-Württemberg, wobei viele Orte gleich mehrere Prädikate innehaben. Für das Projekt wurden insgesamt 13 Regionen mit jeweils ein bis drei Pilotkurorten für eine nähere Betrachtung ausgesucht.

Um mögliche Anpassungsmaßnahmen für jene Pilotorte entwickeln zu können, wurden zuerst die vergangenen, aktuellen und zukünftigen Klimabedingungen mithilfe der COSMO-CLM5-0-16 Simulationsdaten betrachtet. Zukünftige Klimabedingungen wurden mittels Klimasimulationen aus regionalen Klimamodellen analysiert und unter anderem als CTIS abgebildet. Daraus lassen sich die Eigenschaften des lokalen Klimas für die Kurorte und Heilbäder bewerten und schließlich lokale Anpassungsmaßnahmen entwerfen. Gemeinsam mit lokalen Akteuren und Stakeholdern werden in Workshops Anpassungsstrategien entwickelt, so dass ein Handlungsleitfaden entstehen kann.

## Niederfrequente Luftdruckschwankungen und Auswirkungen auf die Gesundheit des Menschen

*Kathrin Graw<sup>1,2</sup>, Felix Oberhardt<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Deutscher Wetterdienst, Zentrum für Medizin-Meteorologische Forschung, 79104 Freiburg im Breisgau, (Deutschland)

<sup>2</sup>Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Fakultät für Umwelt und Natürliche Ressourcen, Professur für Umweltmeteorologie, (Deutschland)

Langperiodische Luftdruckänderungen, wie sie beim Wechsel von Hoch- zu Tiefdruckzentren vorkommen, spielen sich in Zeitspannen von bis zu mehreren Tagen ab (Richner, 1996). Diese Luftdruckänderungen werden von Luftdruckschwankungen mit deutlich kleineren Perioden, den niederfrequenten Luftdruckschwankungen (NFLDS), überlagert. NFLDS können durch atmosphärische Wellen (Infraschallwellen im fernen Frequenzbereich und Schwerewellen) hervorgerufen werden. Neben NFLDS werden auch äquivalente Begriffe wie „rasche atmosphärische Druckschwankungen“ oder „kurzperiodische Luftdruckschwankungen“ verwendet. Die Frequenzen von NFLDS liegen im Bereich zwischen 0,001 Hz und 1 Hz, was einer Periode von 1000 s (16,6 min) bzw. 1 s entspricht (Wanka, 2003). Die Amplituden von NFLDS natürlichen Ursprungs weisen in der Regel Werte zwischen 0,01 hPa und 0,5 hPa auf. Einheitliche Angaben über die maximale Amplitude, die NFLDS in der Atmosphäre erreichen können, sind in der Literatur schwer zu finden. Im Extremfall, wie z.B. bei sehr starken Stürmen können Amplituden von bis zu 3 hPa erreicht werden. Damit entsprechen Amplituden von NFLDS nur einem Bruchteil der Amplituden, die beim Wechsel von einem dynamischen Hoch- (Antizyklone) zu einem Tiefdruckgebiet (Zyklone) bzw. umgekehrt auftreten (Druckänderung etwa 50 hPa) (Richner, 1996). Beim Durchzug einer Kaltfront können innerhalb weniger Stunden beispielsweise Luftdruckänderungen von 5-10 hPa auftreten. NFLDS breiten sich in der Atmosphäre als Wellen aus und können sowohl eine periodische, fast sinusförmige als auch eine chaotische Struktur aufweisen (Richner, 1996; Wanka, 2003).

Wellen, bei denen die Schwingungsebene in Richtung der Wellenausbreitung liegt, werden als Longitudinalwellen (bzw. Kompressions- oder Druckwellen) bezeichnet (Etling, 2008; Nater, 1979). Schallwellen sind ein Beispiel für Longitudinalwellen. Der Frequenzbereich von Infraschallwellen (lat. „infra“ = unter) liegt nach internationalem Standard ISO 7196 (1995) im Bereich von 1-20 Hz. In der Wissenschaft werden jedoch auch andere Definitionen verwendet. Bedard und Georges (2000) bezeichnen Schallwellen mit Frequenzen < 1 Hz als ferne Infraschallwellen und Schallwellen mit Frequenzen im Bereich von 1-20 Hz als nahe Infraschallwellen. Nahe Infraschallwellen werden typischerweise von technischen Geräten erzeugt (Bull et al., 1988; Delyukov & Didyk, 1999). Natürliche Prozesse rufen hingegen hauptsächlich ferne Infraschallwellen hervor.

Wellen, bei denen die Moleküle und Atome senkrecht zur Ausbreitungsrichtung schwingen, werden als Transversalwellen bezeichnet (Etling, 2008; Nater, 1979). Atmosphärische Schwerewellen sind ein Beispiel für Transversalwellen. Bei diesen spielt die auf eine Luftmasse wirkende Schwerkraft die entscheidende Rolle bei der Erzeugung der Schwingung. Die Frequenz atmosphärischer Schwerewellen liegt typischerweise bei einem Wert von 0,002 Hz, was einer Periode von ca. 7 min entspricht. Dennoch führen manche Autoren auch Luftdruckschwankungen mit deutlich kleineren Perioden auf Schwerewellen zurück (vgl. Didyk et al., 2014; Didyk et al., 2012). Nahe der Erdoberfläche weisen Schwerewellen eine maximale Periode von mehreren Stunden auf (Delyukov & Didyk, 1999).

NFLDS bzw. ferne Infraschallwellen und Schwerewellen können durch Turbulenz, Föhn oder Wetterfronten an der Grenzfläche zweier Luftmassen entstehen. Dies sind die drei wichtigsten atmosphärischen Quellen. Beispielsweise werden ferne Infraschallwellen erzeugt, wenn Luft an der Erdoberfläche reibt oder es zur Strömungstrennung an Hausecken kommt (Richner, 1996; Thielen, 1989). Die Intensität der Turbulenz und damit auch die Amplitude der Infraschallwellen ist maßgeblich von der Windgeschwindigkeit abhängig (Woodward et al., 2005). Vor allem hohe Windgeschwindigkeiten, wie sie bei rauen Wetterbedingungen vorkommen, stellen eine starke Infraschallquelle dar (Fritsch, 1982). Beispielsweise kann bei einer Windgeschwindigkeit von 100 km/h

(25 km/h) ein Schallpegel von 135 dB (110 dB) bzw. ein Schalldruck von ca. 1,12 hPa (0,06 hPa) „bei Frequenzen unter 1 Hz“ erzeugt werden (Fritsch, 1982). Bei Föhnwetterlagen können Infraschallwellen und insbesondere Schwerewellen entstehen. Die maximale Periode von NFLDS bei einer Föhnwetterlage beträgt 1500 s (25 min). Treten Wetterfronten auf, nimmt die Amplitude von Infraschall- und Schwerewellen mit der Intensität der Wetterfront zu (Richner, 1977). Die maximale Periode von NFLDS beim Durchzug von Wetterfronten beträgt 1800 s (30 min) (Nater, 1979).

Der Hörsinn des Menschen kann die durch Schwerewellen und ferne Infraschallwellen hervorgerufenen NFLDS nicht erfassen, da deren Frequenz zu niedrig ist (Leventhall, 2007). Es ist jedoch nicht ausgeschlossen, dass mehrere Rezeptoren im menschlichen Körper auch auf NFLDS reagieren könnten. U.a. sind dies Barorezeptoren, die an den Wänden der großen systemrelevanten Arterien liegen (z.B. am Hals) und den Blutdruck überwachen. Falls ihre Funktion durch NFLDS gestört wird, könnte dies einen Einfluss auf den Blutdruck haben und damit auf die Gesundheit des Menschen.

Dass das Wetter einen Einfluss auf die menschliche Gesundheit hat, ist mittels epidemiologischer Studien gut belegt. Ein einzelner biotroper Faktor konnte jedoch nicht gefunden werden. Stattdessen herrscht in der Wissenschaft Konsens darüber, dass es vor allem das Zusammenspiel mehrerer meteorologischer Parameter ist, die gleichzeitig auf den Menschen einwirken und einen Einfluss auf die Gesundheit des Menschen ausüben (Zacharias, 2012). Einer dieser Parameter könnten NFLDS sein, auch wenn die Wirkmechanismen im Detail noch nicht erklärt werden können.

Das Ergebnis einer repräsentativen Bevölkerungsbefragung zur Wetterfühligkeit in Deutschland lässt vermuten, dass hohe Amplituden von NFLDS einen ungünstigen Einfluss auf den Menschen haben könnten, da die Befragten stürmisches Wetter sowie rasche Temperaturänderungen (es wird wärmer, es wird kälter) als die drei häufigsten Wettersituationen angaben, die einen Einfluss auf ihre Gesundheit haben. Diese drei Wettersituationen können wie oben beschrieben NFLDS erzeugen und lassen sich zudem mit den im DWD verwendeten biosynoptischen Wetterklassen (Tiefzentrum, aufziehende Warmfront, Kaltfrontrückseite) beschreiben (Zacharias und Koppe, 2015).

In einem einjährigen Zeitraum von Mitte 2022 bis Mitte 2023 wurden in Freiburg im Breisgau Luftdruck-Messungen mit Hilfe eines low-cost sensors, der eine hohe zeitliche Auflösung von einer Sekunde besitzt, durchgeführt. Anhand dieser konnte eine Analyse von NFLDS und vorhergesagten biosynoptischen Wetterklassen des DWD erfolgen, die im Rahmen einer Bachelorarbeit durchgeführt wurde (Oberhardt, 2023). Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl die gemittelte Amplitude als auch die maximale Amplitude der NFLDS für die Biowetterklassen 2 (Warmluftadvective Tiefvorderseite), 3 (Tiefzentrum) und 4 (Kaltluftadvective Tiefrückseite) signifikant größer ist als für die Biowetterklasse 1 (Zentrum eines Hochdruckgebietes) oder 5 (indifferente Wetterlage, nicht 1-4), (Abb. 1). Dementsprechend treten während biotroper Wetterklassen (2, 3 und 4), die sich negativ auf die Gesundheit auswirken können, NFLDS mit signifikant größeren Amplituden auf als während der Wetterklassen 1 und 5, die eher mit einem positiven oder keinem Einfluss auf die Gesundheit assoziiert werden. Die am häufigsten auftretende Wetterklasse ist in etwa 50% aller Fälle die Wetterklasse 5. Die Wetterklassen 1 bis 4 verteilen sich auf die verbleibenden 50%.

Um die Vermutungen zu NFLDS und deren Auswirkungen auf die Gesundheit des Menschen aus verschiedenen wissenschaftlichen Studien belegen oder widerlegen zu können sind weitere aussagekräftige Forschungsergebnisse notwendig. Die dargestellten Ergebnisse unterstützen die Vermutung, dass NFLDS einen Einfluss auf die menschliche Gesundheit haben könnten. Nichtsdestotrotz sind Scheinkorrelationen nicht ausgeschlossen. Weitere Untersuchungen zu medizinischen Wirkmechanismen sind notwendig, um das Verständnis für die Wirkungsweise von NFLDS auf den menschlichen Körper zu erhöhen.

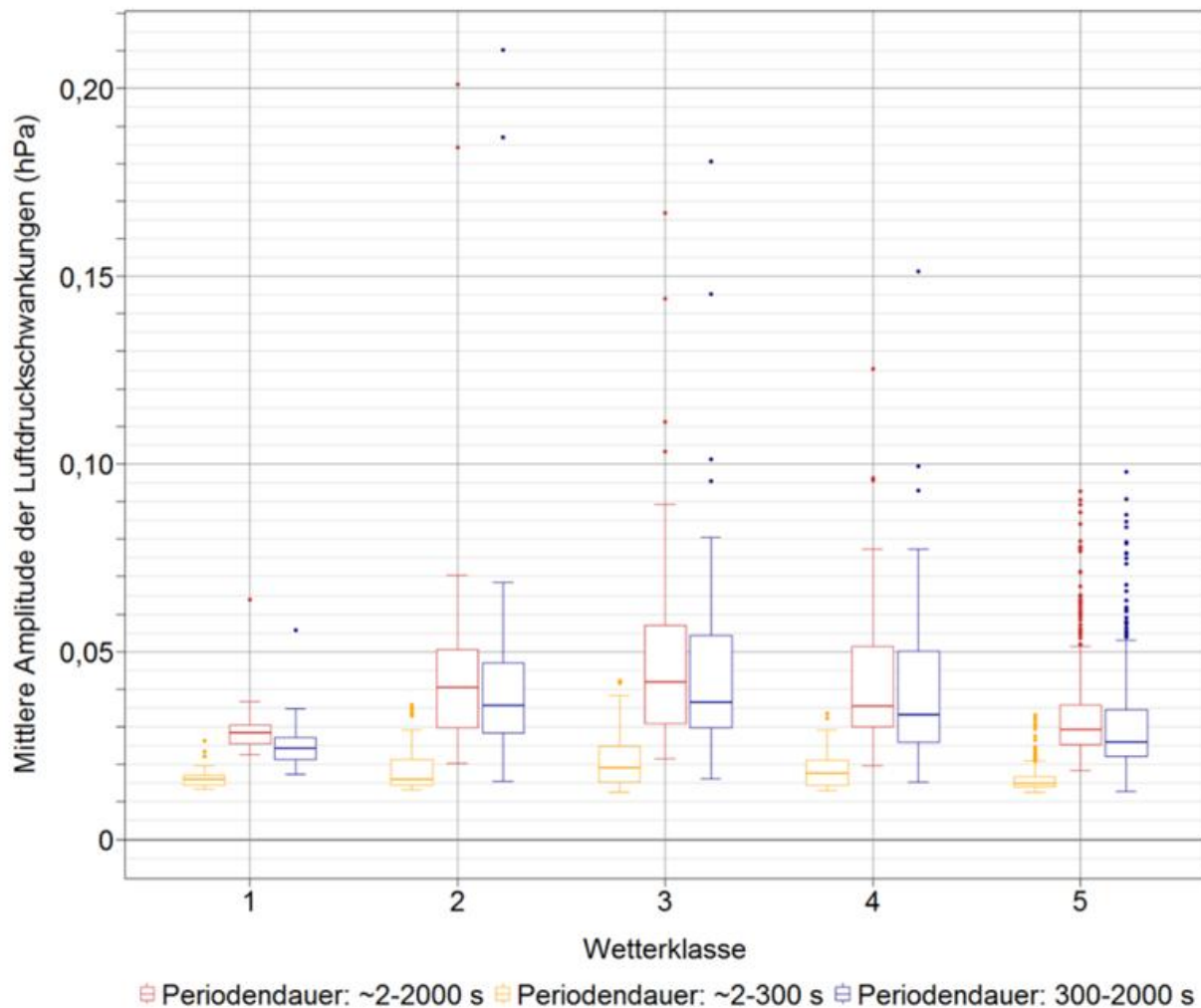


Abb. 1: Verteilung der mittleren Amplituden der NFLDS (rot) sowie unterteilt in ferne Infraschallwellen (orange) und Schwerewellen (blau) in Abhängigkeit der biosynoptischen Wetterklasse. Länge der Whisker entspricht maximal der 1,5-fachen Länge des Interquartilsabstands.

#### Literatur:

- BEDARD, A., GEORGES, T., 2000: Atmospheric infrasound. *Acoustics Australia*, **28**(2), 47–52.
- BULL, G., GOERING, H., NEISSER, J., 1988: Atmosphärische Infraschallwellen. *Zeitschrift für Meteorologie*, **38**(5), 265–280.
- DELYUKOV, A., DIDYK, L., 1999: The effects of extra-low-frequency atmospheric pressure oscillations on human mental activity. *International Journal of Biometeorology*, **43**(1), 31–37. <https://doi.org/10.1007/s004840050113>
- ETLING, D., 2008: Theoretische Meteorologie: Eine Einführung (3., erw. und aktualisierte Aufl.). Springer.
- FRITSCH, G., 1982: Infraschall. *Physik in unserer Zeit*, **13**(4), 104–110.
- ISO (International Organization for Standardization), 1995: Acoustics – Frequency weighting for infrasound measurements. ISO 7196, Genf.
- LEVENTHALL, G., 2007: What is infrasound? *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, **93**(1-3), 130–137.
- THIELEN, J., 1989: Mustererkennung kurzperiodischer Luftdruckfluktuationen, Zusammenhänge mit Wetterphasen und Betriebsunfallhäufigkeiten. *Diplomarbeit*, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe.
- NATER, W., 1979: Grenzschichtwellen als Ursache von kurzperiodischen Druckschwankungen. *Dissertation*, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.

- OBERHARDT, F., 2023: Niederfrequente Luftdruckschwankungen – Auswirkungen auf die Menschliche Gesundheit sowie exemplarische Analyse von Luftdruckdaten für Freiburg im Breisgau. *Bachelorarbeit*, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg im Breisgau.
- RICHNER, H., 1977: Pressure fluctuations caused by atmospheric waves and their variation under different weather conditions. *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Serie A*, **26**(4), 309–322. <https://doi.org/10.1007/BF02247818> (letzter Zugriff 15. Dez. 2023)
- RICHNER, H., 1996: Der Mensch im Einflussbereich von Wetter und Klima. *Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich*, **141**, 249–259.
- WANKA, E., 2003: Messung und Analyse niederfrequenter Luftdruckschwankungen in München - Assoziationen zu Rettungsdienstesätzen und Verkehrsunfällen sowie Symptombefragungsdaten Wetterfühligkeit. *Diplomarbeit*, Universität zu Köln.
- WOODWARD, R., ISRAELSSON, H., BONDAR, I., MCLAUGHLIN, K., BOWMAN, J. R., BASS, H., 2005: Understanding wind-generated infrasound noise. *Proceedings of the 27th Seismic Research Review: Ground-Based Nuclear Explosion Monitoring Technologies*, 866–875.
- ZACHARIAS, S., 2012: Literaturstudie zum Einfluss des Wetters auf die menschliche Gesundheit. DWD/ZMMF/UBA, Forschungskennzahl 3711 61 238. [https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Pool/Forschungsdatenbank/fkz\\_3711\\_61\\_238\\_klimawandel\\_einfluss\\_bevoelkerung\\_anlage\\_1\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Forschungsdatenbank/fkz_3711_61_238_klimawandel_einfluss_bevoelkerung_anlage_1_bf.pdf) (letzter Zugriff 15. Dez. 2023).
- ZACHARIAS, S., KOPPE, C., 2015: Einfluss des Klimawandels auf die Biotropie des Wetters und die Gesundheit bzw. die Leistungsfähigkeit der Bevölkerung in Deutschland. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/ug\\_06\\_2015\\_einfluss\\_des\\_klimawandels\\_auf\\_die\\_biotropie\\_des\\_wetters\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/ug_06_2015_einfluss_des_klimawandels_auf_die_biotropie_des_wetters_0.pdf) (letzter Zugriff 15. Dez. 2023)

**Schlüsselwörter:** Niederfrequente Luftdruckschwankungen, Amplitude, Gesundheit, Wetterfühligkeit, biosynoptische Wetterklassen

## 5 Wälder im Klimawandel

### 5.1 Vorträge

#### Der Waldzustandsmonitor – ein Wissenstransferprojekt

*D. Doktor<sup>1,2,3</sup>, M. Lange<sup>1,2</sup>, S. Preid<sup>1,2</sup>, A. Reichmuth<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung - UFZ, Department Fernerkundung, Leipzig (Deutschland)

<sup>2</sup>Remote Sensing Centre for Earth System Research - RSC4Earth, Leipzig (Deutschland)

<sup>3</sup>German Center for Integrative Biodiversity Research - iDiv Halle-Jena-Leipzig (Deutschland)

Der Waldzustandsmonitor ist ein von der Helmholtz-Gemeinschaft finanziertes Projekt in der [Arbeitsgruppe Landbedeckung & Dynamik](#) am [Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung - UFZ](#) in Leipzig. Der Monitor stellt (fernerkundungsbasierte) flächendeckende jährliche/saisonale Ableitungen des Waldzustands fortlaufend seit 2017 bereit. Dies sind wertvolle komplementäre Informationen im Vergleich zu gängigen stichprobenartigen Erhebungen wie beispielsweise dem [Waldzustandsbericht](#). Dieser basiert auf forstlich genauen und umfassenden Daten, ist aber deswegen sehr zeit- und personalintensiv und in der Anzahl der Erhebungspunkte limitiert. Durch die Verwendung beider Komponenten - Monitor + Bericht - kann erstmals i) gerade die regionale Betrachtungsebene robuster abgebildet werden und ii) eine flächenhafte Übersetzung der forstlich erhobenen Statistiken erfolgen. Das macht die drastischen Klimawandel bedingten dynamischen Veränderungen im Wald auch für Nicht-Fachleute einfach einsehbar.

In diesem Projekt werden aktuelle Satellitendaten im Vergleich zu langjährigen Beobachtungen ausgewertet, um Veränderungen des Waldes bzw. Anomalien auszuweisen. Anschließend werden diese Anomalien anhand von forstwirtschaftlichen Erhebungen und Schadkartierungen an ausgewählten Beobachtungsstandorten validiert. Der Monitor liefert damit Informationen für sämtliche von Wald bedeckten Flächen in Deutschland. Die Karten von 2017-2022 zeigen insbesondere für Gebiete in der Mitte Deutschlands, z.B. für die Regionen Harz, Sauerland und Sächsische Schweiz, einen deutlichen Anstieg geschädigter Waldfläche, speziell ab 2019. Dafür gibt es vielfältige Ursachen: Hitze, Dürre und Schädlingsaufkommen sowie deren Zusammenspiel schädigen die Wälder und führen auch zu Folgeschäden, u.a. Sturmwurf/Sturmbruch und erhöhte Waldbrandgefahr. Die wissenschaftliche Aufarbeitung mittels Satellitendaten zeigt erstmals flächenhaft die durch den Klimawandel induzierte Dynamik des Waldzustands. Neben dem Waldzustand leitet das Projekt auch weitere Produkte wie Hauptbaumarten, die Vegetationslänge (Phänologie) oder die zukünftige Baumartenverbreitung unter dem Einfluss des Klimawandels ab.

Der UFZ-Waldmonitor ersetzt nicht die forstlichen Erhebungen für den Waldzustandsbericht, die im Auftrag des [Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft \(BMEL\)](#) stattfinden, sondern ist als komplementäre Ergänzung zu verstehen.

## Windbruchfläche ist nach Wiederaufforstung 11 Jahre CO<sub>2</sub>-Quelle

Thomas Grünwald, Uta Moderow, Matthias Mauder, Christian Bernhofer

Technische Universität Dresden, Professur für Meteorologie, Piener Str. 23, 01737 Tharandt (Deutschland)

Der Klimawandel und die damit prognostizierte Zunahme von Extremereignissen erfordern es, die Auswirkungen von Windwürfen in Wäldern zu betrachten, um zuverlässige Rückschlüsse über das Potential zukünftiger CO<sub>2</sub>-Senken treffen zu können.

Im Jahr 2007 verursachte ein schwerer Wintersturm („Kyrill“) in vielen Wäldern Deutschlands beträchtliche Sturmschäden mit ausgedehnten Windwurfflächen, was wiederum zu Kahlschlägen und Neuaufforstungen führte. Wir stellen Ergebnisse eines jungen Eichenbestandes vor, der 2008 auf der Windwurffläche eines ehemaligen Altlichtenbestandes durch das Pflanzen von Setzlingen (*Quercus robur*, *Quercus rubra*) etabliert wurde. 2010 wurden an diesem Standort Messungen zum CO<sub>2</sub>-Austausch auf Grundlage der Eddy-Kovarianz-Methode begonnen. Ergänzend werden verschiedene meteorologische Variablen erfasst (u.a. Wind, Temperatur, Strahlung, Niederschlag, Bodenfeuchte). Der frühe Beginn der Messungen nach der Pflanzung ermöglichte es, verschiedene Stadien der Entwicklung der Eichenpflanzung zu erfassen. Parallel dazu betreiben wir analoge CO<sub>2</sub>-Flussmessungen über einem ca. 5 km entfernten alten Fichtenbestand (Grünwald et al., 2007), welcher zum Vergleich als ungestörtes Ökosystem herangezogen werden kann. Beide Standorte befinden sich im Tharandter Wald, einem 6000 ha großen Waldgebiet in Sachsen, mit sehr ähnlichen klimatischen Bedingungen, jedoch verschiedenen Böden. Abbildung 1 zeigt die Entwicklung der Bestände beider Standorte zwischen 2010 und 2022.

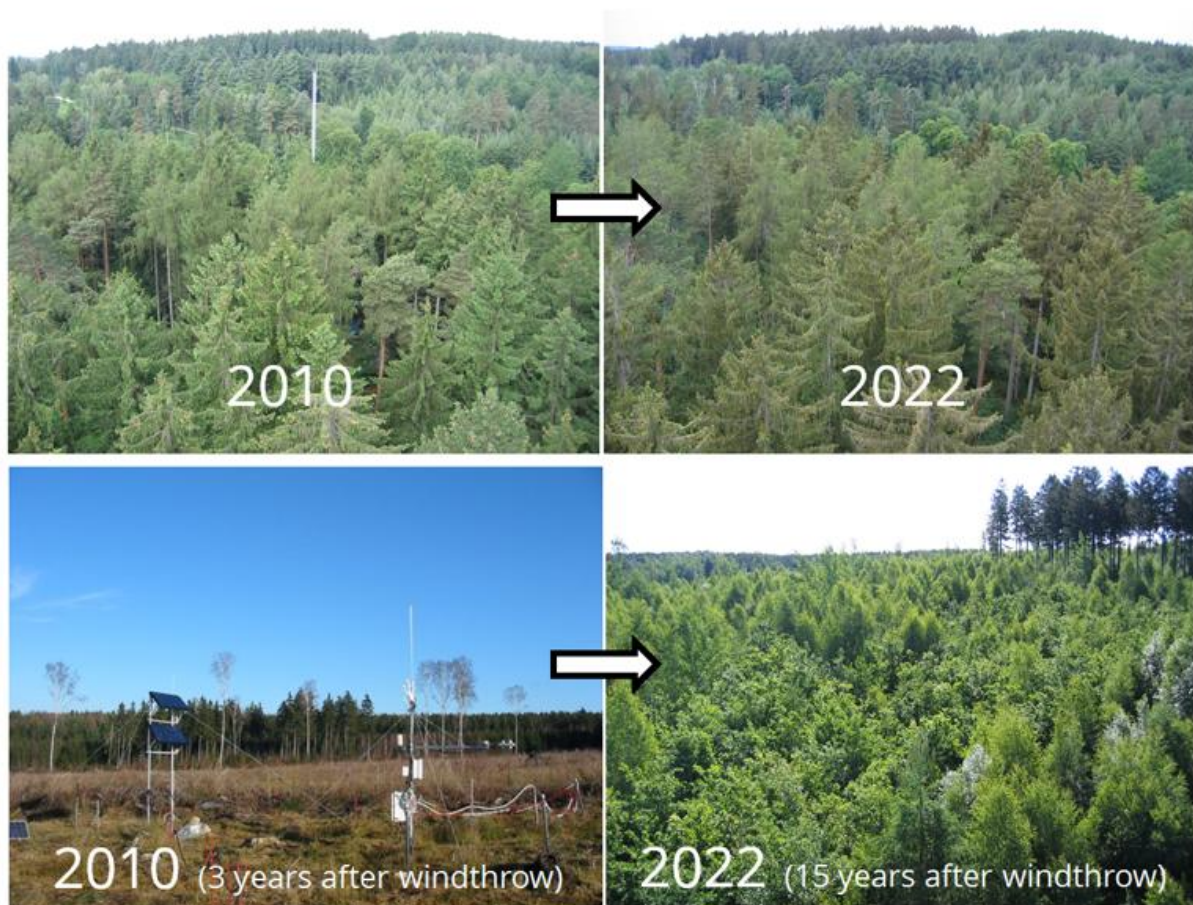


Abb. 1: Altlichtenbestand (oben) und mit Eichen bepfanzte Fläche nach Windbruch 2007 des vormaligen Altlichtenbestandes (Fotos der Jahre 2010 und 2022).

In den ersten acht Messjahren (2010 – 2017) waren die Jahressummen der Nettoökosystemproduktion (NEP) des Eichenstandortes im deutlich negativen Bereich (im Mittel  $-390 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ , Abb. 2/3), d.h. es wurde mehr  $\text{CO}_2$  freigesetzt als durch die jungen Bäume und die zusätzliche, krautige Pioniervegetation gebunden wurde (ähnliche  $\text{CO}_2$ -Quellen wurden von Ney et al., 2019 nach einem Kahlschlag beobachtet). Ursache dafür war eine Zunahme der Ökosystematmung infolge Erwärmung des Erdbodens wegen fehlender Beschattung bei gleichzeitig reduzierter Primärproduktion. Auf Jahresbasis war diese  $\text{CO}_2$ -Quelle ähnlich groß wie die mittlere  $\text{CO}_2$ -Senke des Altlichenbestandes im selben Zeitraum ( $430 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ , Abb. 2/3), d.h., die hektarbezogene  $\text{CO}_2$ -Senke des alten Fichtenwaldes wurde fast vollständig durch die entsprechende  $\text{CO}_2$ -Quelle der jungen Eichenpflanzung kompensiert.

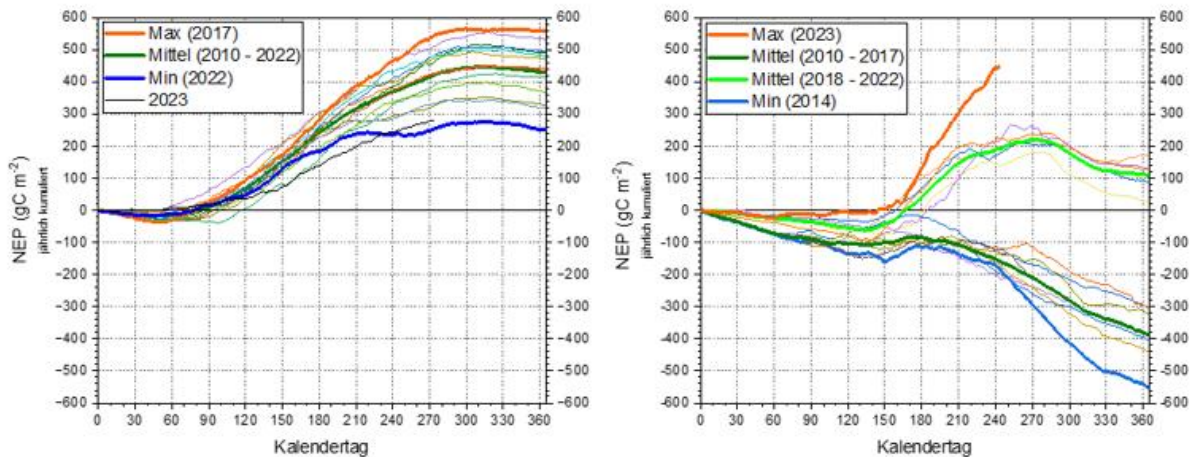


Abb. 2: Jährlich kumulierte Nettoökosystemproduktivitäten (NEP, positive Werte -  $\text{CO}_2$ -Senke) des Altlichenbestandes (links) und des jungen Eichenbestandes (rechts) im Zeitraum 2010 – 2023. Die dünnen Linien zeigen die entsprechenden Werte für alle anderen Jahre in diesem Zeitraum.

Der Übergang der Eichenpflanzung von einer  $\text{CO}_2$ -Quelle zu einer  $\text{CO}_2$ -Senke erfolgte relativ abrupt, ohne dass die Quelle in den Vorjahren kontinuierlich abgenommen hatte (Abb. 3). Seit 2018 stellt der Eichenstandort eine  $\text{CO}_2$ -Senke dar (Mittel 2018 – 2022:  $110 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ , Abb. 3), die jedoch zunächst kleiner war als die  $\text{CO}_2$ -Senke des Altlichenbestandes (Mittel 2018 – 2022:  $340 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ). Im Zeitraum 2018 – 2022 ist zudem, trockenheitsbedingt, eine deutliche Reduktion der  $\text{CO}_2$ -Senke des Altlichenbestandes (-21%) festzustellen (Abb. 3).

Unter der Annahme, dass sich der vormalige Fichtenbestand am jetzigen Eichenstandort vor der Störung 2007 hinsichtlich seiner  $\text{CO}_2$ -Senke ähnlich verhalten hat wie der intakte Altlichenbestand, beträgt die durch den Windbruch verursachte zusätzliche  $\text{CO}_2$ -Abgabe an die Atmosphäre im Zeitraum 2010 – 2022 (Summe aus  $\text{CO}_2$ -Quellen und reduzierten  $\text{CO}_2$ -Senken)  $8150 \text{ gC m}^{-2}$  bzw.  $630 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ .

Im Jahr 2023 nahm die  $\text{CO}_2$ -Senke des Eichenstandorts deutlich zu und wird wahrscheinlich erstmals eine ähnliche Menge  $\text{CO}_2$  binden wie der alte Fichtenbestand. Um diesen Zustand bezüglich der  $\text{CO}_2$ -Senke (wieder) zu erreichen, bedurfte es 17 Jahre (seit dem Windbruch Anfang 2007).

Im Gegensatz zu den atmosphärischen  $\text{CO}_2$ -Flüssen unterscheiden sich die Verdunstungsraten beider Standorte deutlich weniger (Abb. 4). Im Zeitraum 2010 – 2022 beträgt die durchschnittliche Verdunstung des Altlichenbestandes  $490 (\pm 55) \text{ mm a}^{-1}$  und des jungen Eichenbestandes  $615 (\pm 70) \text{ mm a}^{-1}$ . Ursache für diese Differenz ist die geringere Bodenwasserverfügbarkeit am Standort des Altlichenbestandes, dessen Bodenfeuchte in 10 cm Tiefe durchschnittlich 10 Vol-% beträgt. Am Standort des jungen Eichenbestandes beträgt dieser Wert im Mittel 35 Vol-%.

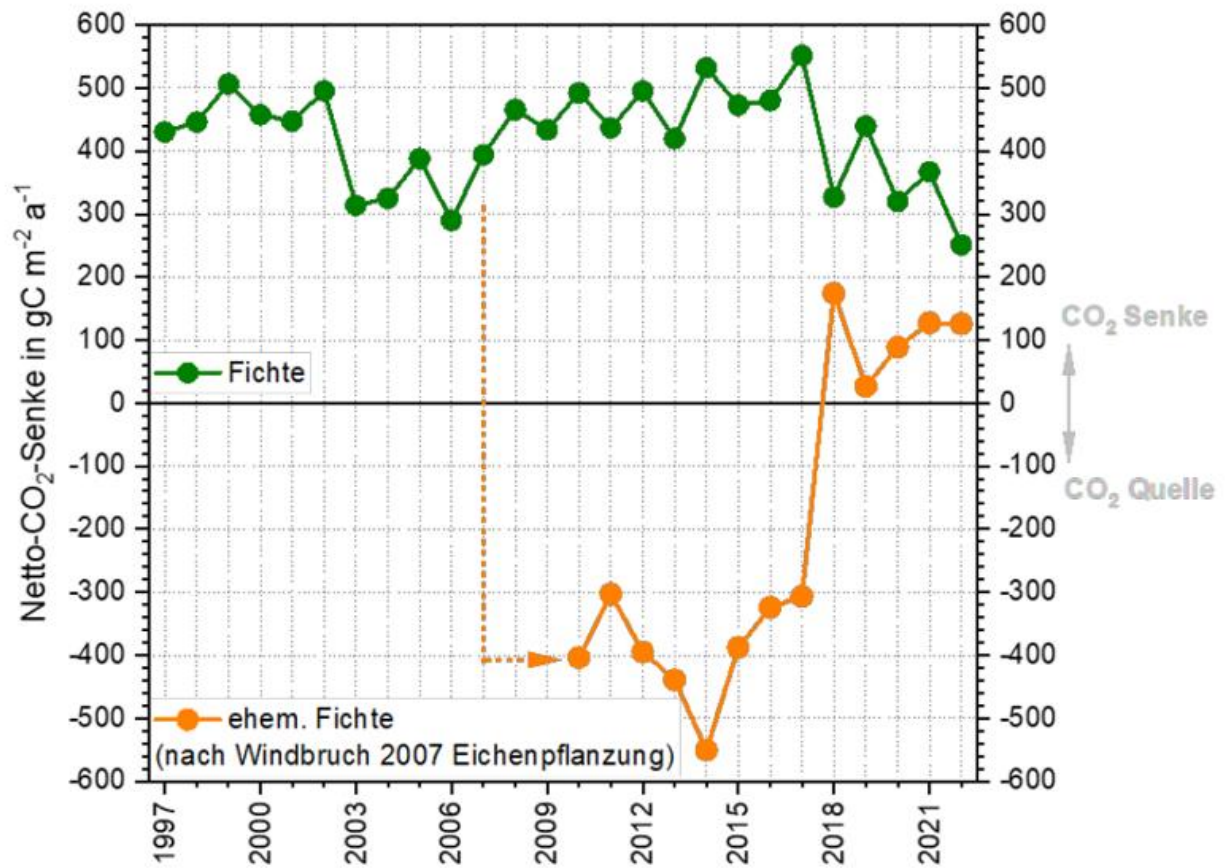


Abb. 3: Jahressummen des NEP (Netto-CO<sub>2</sub>-Senke) des Altfichtenbestandes (1997 – 2022) und des jungen Eichenbestandes (2010 – 2022).

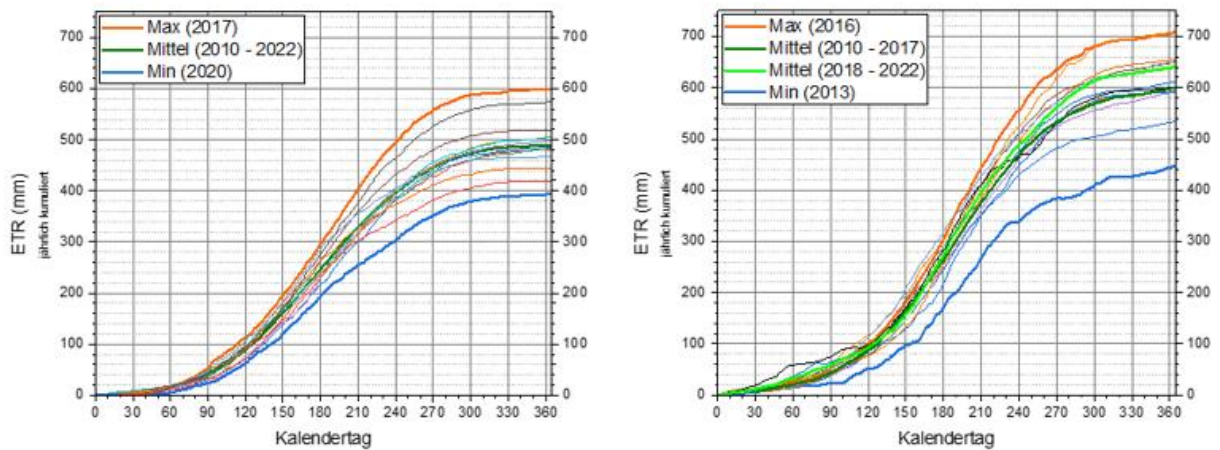


Abb. 4: Jährlich kumulierte Verdunstung ETR des Altfichtenbestandes (links) und des jungen Eichenbestandes (rechts) im Zeitraum 2010 – 2022.

**Literatur:**

GRÜNWALD, T., BERNHOFER C., 2007. A decade of carbon, water and energy flux measurements of an old spruce forest at the Anchor Station Tharandt. *Tellus, Ser. B Chem. Phys. Meteorol.* 59, 387–396.

NEY et al., 2019. CO<sub>2</sub> fluxes before and after partial deforestation of a Central European spruce forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 274, 61-74.

**Schlüsselwörter:** CO<sub>2</sub>-Austausch, Nettoökosystemproduktion, Klimawandel, Windwurf

## Estimating carbon fluxes immediately after a wildfire and in the following years

*Bruna R. F. Oliveira<sup>1</sup>; Jan J. Keizer<sup>2</sup>; Thomas Foken<sup>3,4</sup>*

<sup>1</sup>Center for Environmental and Marine Studies (CESAM), Department of Environment and Planning, University of Aveiro, Aveiro (Portugal)

<sup>2</sup>GEOBIOTEC Geobiosciências, Geoengenharia e Geotecnologias, Department of Environment and Planning, University of Aveiro, Aveiro (Portugal)

<sup>3</sup>Universität Bayreuth, Bayreuther Zentrum für Ökologie und Umweltforschung (BayCEER), Bayreuth (Germany)

<sup>4</sup>Universität Bamberg, Lehrstuhl für Informatik, insbesondere Mobile Softwaresysteme/ Mobilität, Bamberg (Germany)

The increased frequency and intensity of extreme climate events appears to be leading to an intensification of wildfire regimes across the world. The few existing eddy-covariance studies in burnt areas have suggested that forests can become carbon sources for months to decades after wildfire. In contrary to these past studies, we installed an eddy-covariance system in a young Maritime Pine stand just 40 days after a wildfire that occurred on 13 August 2017 or, in other words, before the start of the first post-fire hydrological year. The system is still operating. The study area (39.370° N, 08.060° W) was located in Vila de Rei, Portugal, in a Mediterranean climate zone at the transition of Köppen–Geiger classes Csa and Csb, with dry summers (Kottek et al., 2006).

A picture of the tower immediately after installation is shown in Figure 1. The standing pine trunks in the immediate surroundings of the tower were approximately 8m high, corresponding to a zero-plane displacement of 3.8 m. The data for the calculation of the turbulent fluxes were sampled and stored at 20 Hz, while the fluxes were calculated over 30 min intervals. All other data were sampled at 0.02 Hz, stored at 15 min intervals and then averaged over the 30 min intervals, except for rainfall. The sonic anemometer was a CSAT3 (Campbell Sci. Inc.) and a gas analyzer a Licor 7500A (LI-COR Biosciences). Further details of the used sensors and the installation are given in Oliveira et al. (2021).



Fig. 1: The 12m slim tower with the eddy-covariance system immediately after its installation (photograph: J. Jacob Keizer, 22 September 2017).

The eddy-covariance (EC) method is well-established for calculating energy and matter fluxes between the atmosphere and the underlying surface (Aubinet et al., 2012). The 30 min EC values were calculated automatically by the Campbell EasyFlux software in the CR6 data logger but just for checking the operational status of the system. The calculations presented here were done using the software package TK3 (Mauder and Foken, 2015). The quality of the flux data was checked following the method by Foken and Wichura (1996) and using the latest published version of the flagging system (Foken et al., 2012). Because of the low fluxes, this procedure was also used in gap filling (Ruppert et al., 2006) instead of the often-used  $u_{*c}$ -criterion (Goulden et al., 1996). Furthermore, it was necessary to determine the gap-filling parametrizations in the first year for different soil water contents. The procedures are detailed in the Supplement of Oliveira et al. (2021) and in a special conference paper (Foken et al., 2023). For the analysis of the first 3 years of data presented here, an additional quality flag was included based on the size of the WPL-correction (Jentsch et al., 2021; Webb et al., 1980).

The maritime pine plantation was significantly affected by two storms during December 2019 that resulted in a large-scale windthrow. Oliveira et al. (2022) analyzed the impacts of this windthrow on the aerodynamic characteristics of zero-plane displacement and roughness length and, ultimately, their implications for the turbulent fluxes. The turbulent fluxes were only affected to a minor degree by the windthrow, but the footprint area of the flux tower changed markedly so that the target area of the measurements had to be redetermined. Even so, the area around the tower was sufficiently homogeneous that no effect in the long-term measurements could be identified.

Two special situations with very low fluxes are shown here from Oliveira et al. (2021). The period from 26 to 29 September 2017, immediately after the tower became operational, was selected for revealing the role of dew formation on NEE. By then, no rainfall had occurred after the wildfire, and the topsoil was very dry. During this period, the sky was mostly clear, and the sensible heat flux was of the same order as the net radiation. The fluxes of both  $\text{CO}_2$  and NEE (including storage term) were about zero during nighttime and showed an uptake up to  $5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  during daytime. A substantial emission of  $\text{CO}_2$  only occurred around sunrise on 28 September 2017, when the relative humidity at the top of the flux tower reached 80 % - 90% and dew formation took place. Dew formation simultaneously produced a positive, upward sensible heat flux due to the heat of condensation and a negative, downward latent heat flux, while the subsequent evaporation of the dew produced fluxes of the opposite signs. The suggestion that the positive NEE flux during the early morning of 28 September 2017 was triggered by dew formation was further analyzed by calculating the NEE fluxes with a 1 min time resolution, using the wavelet method (Schaller et al., 2017) and shown in Figure 2.

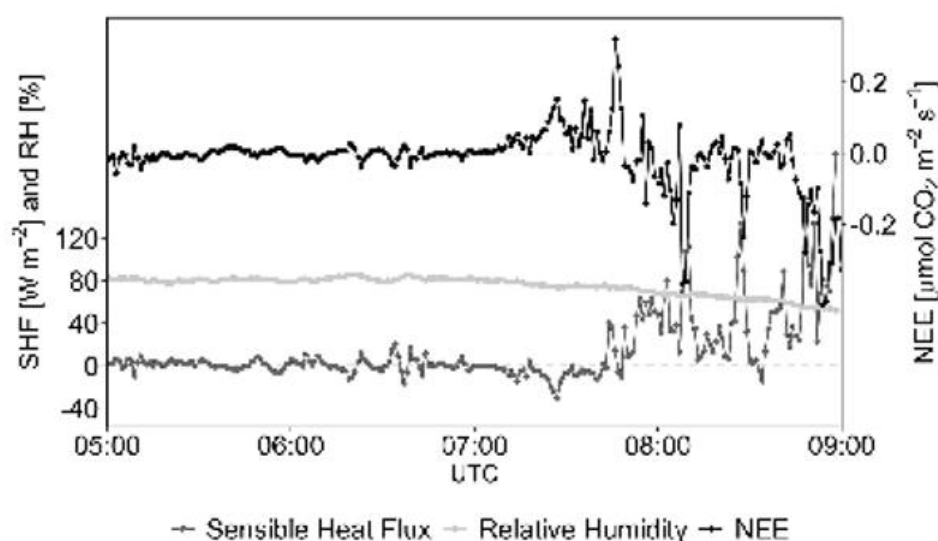


Fig. 2: Relative humidity (RH) and sensible heat (SHF) and NEE fluxes with a 1 min resolution during the morning hours of 28 September 2017, indicating dew formation followed by evaporation of dew and associated  $\text{CO}_2$  emission (NEE) between 06:30 and 07:30 UTC (Oliveira et al., 2021), © Authors.

The first post-fire rainfall events occurred more than 2 months after the wildfire, between 17 to 22 October 2017, significantly increasing soil VWC. The bulk of this rainfall occurred during the night from 17 to 18 October 2017 (8.4 mm) and around noon on 20 October 2017 (3.2 mm). With the onset of the autumn rainfall, the ecosystem started to be a source of CO<sub>2</sub>, but the fluxes decreased again on 22 October 2017. Worth noting was that the second, smaller rainfall event of 20 October 2017 seemed to have a greater impact on CO<sub>2</sub> emissions than the first event of 17 and 18 October 2017. The large scatter in NEE fluxes observed during some periods could be explained by conditions of low turbulence combined with the generally low fluxes. The role of rainfall periods in NEE fluxes during the initial post-fire window of disturbance was also evidenced by the cumulative NEE values from 1 October to 31 December 2017 (Fig. 3).

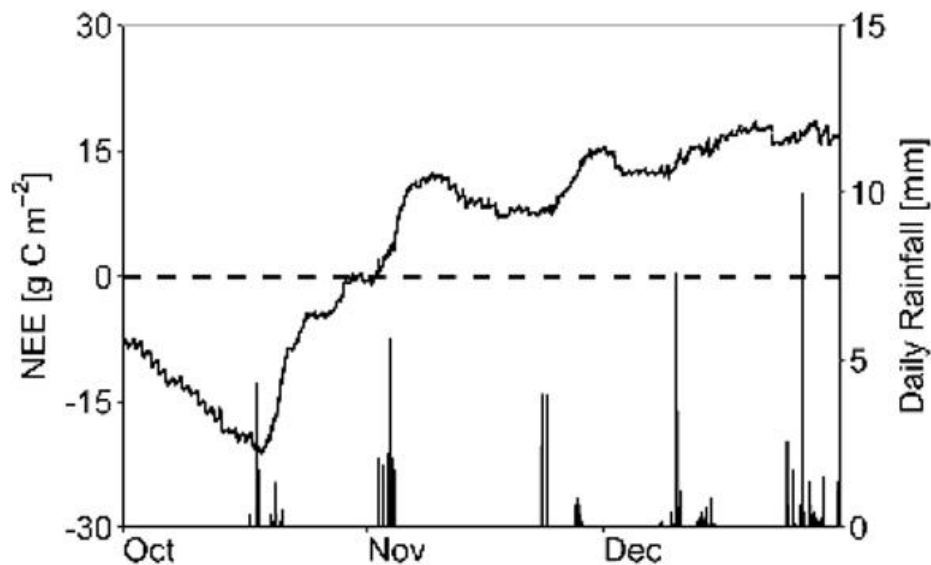


Fig. 3: Cumulative NEE fluxes and 30 min rainfall during the initial window of disturbance, from 1 October to 31 December 2017 (Oliveira et al., 2021), © Authors.

The system of quality control (Foken et al., 2023) was supplemented by a complementary control of the WPL correction, developed from measurements over permafrost (Jentsch et al., 2021). This was done because the correction for small fluxes is sometimes much larger than the actual fluxes and sometimes even of a different sign. The procedure was applied to the data already published by Oliveira et al. (2021). The application of the additional WPL test proved to be useful especially in the first years, when fluxes were particularly low. The cases with unfavorable  $Q_{F_{WPL}}$  flag ( $> 1$ ,  $Q_{F_{WPL}} = \text{WPL-corrected}/\text{NEE}$ ) decreased significantly with increasing fluxes and elapsing time since wildfire. Particularly influenced in all years were the especially small fluxes. The influence was particularly low not only at strong respiration ( $Q_{F_{WPL}} < 0.2$ ) but also at large CO<sub>2</sub> uptake ( $Q_{F_{WPL}} < 1$ ).

After the fast recovery of the ecosystem during the first post-fire year, the maritime pine was a carbon sink during the second and third post-fire years. In this study case, the yearly and seasonal patterns, as well as the effects of rainfall following dry periods and the windthrow in the second year had negligible effect on the cumulative fluxes. The cumulative NEE is shown in Figure 4, where only values  $Q_{F_{WPL}} > 5$  were excluded and replaced by gap-filling. The gap-filling procedure complies with the standard procedure (Falge et al., 2001) and was described in detail in Oliveira et al. (2021), except that differences in soil water content were no longer considered relevant after the first year. A study on the application of different threshold values in the WPL test is in preparation.

In summary, it can be stated that a Mediterranean pine forest is only a source of CO<sub>2</sub> immediately after the wildfire. In contrast to more northern latitudes, the rapid development of ground flora and, from the second year onwards, of pines and eucalyptus quickly turns the forest back into a CO<sub>2</sub> sink.

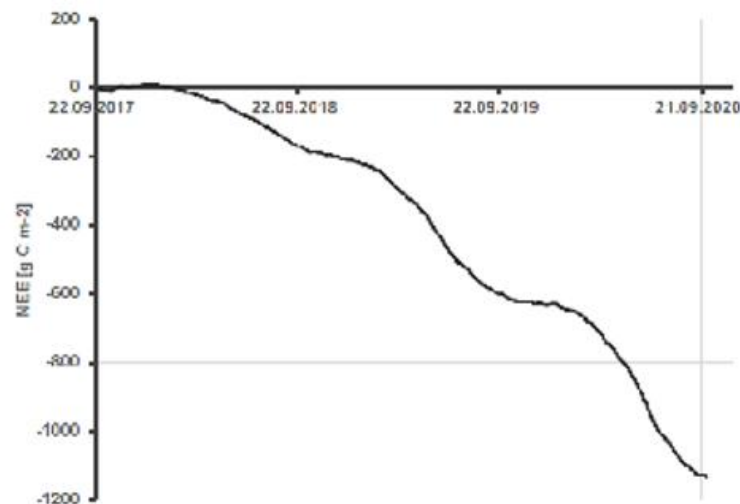


Fig. 4: Cumulative values of NEE in the first three years after the wildfire, whereby only values with  $Q_{FWPL} > 5$  were excluded. Detailed illustration for the first months see Fig. 1.

*Acknowledgement:* This work was supported by the projects ModelEco (PTDC/ASP-SIL/3504/2020), funded by national funds (OE) through FCT/MCTES, and FIRE-C-BUDs (PTDC/AGR-FOR/4143/2014 - POCI-01-0145-FEDER-016780), funded by the FCT/MEC with co-funding by the FEDER, within the PT2020 Partnership Agreement and Compete 2020. Bruna R.F. Oliveira was funded by national funds through FCT, I.P. and FEDER funds through COMPETE 2020, within the scope of the Stimulus for Individual Scientific Employment (2021.00785.CEECIND). Thanks are due to FCT/MCTES for the financial support to CESAM (UIDP/50017/2020+UIDB/50017/2020), through national funds.

## References:

- AUBINET, M., T. VESALA, D. PAPALE (Editors), 2012. Eddy Covariance: A Practical Guide to Measurement and Data Analysis. Springer, Dordrecht, Heidelberg, London, New York, 438 pp. doi: 10.1007/978-94-007-2351-1
- FALGE, E., D. BALDOCCHI, R. OLSON, P. ANTHONI, M. AUBINET, C. BERNHOFER, G. BURBA, R. CEULEMANS, R. CLEMENT, H. DOLMAN, A. GRANIER, P. GROSS, T. GRUNWALD, D. HOLLINGER, N.O. JENSEN, G. KATUL, P. KERONEN, A. KOWALSKI, C.T. LAI, B.E. LAW, T. MEYERS, H. MONCRIEFF, E. MOORS, J.W. MUNGER, K. PILEGAARD, U. RANNIK, C. REBMANN, A. SUYKER, J. TENHUNEN, K. TU, S. VERMA, T. VESALA, K. WILSON, S. WOFYSY, 2001. Gap filling strategies for long term energy flux data sets. *Agric. For. Meteorol.* **107**, 71-77. doi: 10.1016/S0168-1923(00)00235-5
- FOKEN, T., R. LEUNING, S.P. ONCLEY, M. MAUDER, M. AUBINET, 2012. Corrections and data quality. In: M. AUBINET, T. VESALA AND D. PAPALE (Editors), Eddy Covariance: A Practical Guide to Measurement and Data Analysis. Springer, Dordrecht, Heidelberg, London, New York, pp. 85-131. doi: 10.1007/978-94-007-2351-1\_4
- FOKEN, T., B.R.F. OLIVEIRA, K. JENTZSCH, F. KITTLER, C. SCHALLER, J.J. KEIZER, J. BOIKE, M. GÖCKEDE, 2023. Quality control of very small trace gas fluxes, 24th Conference on Boundary Layers and Turbulence. American Meteorological Society, Denver, pp. 1-6. doi: 10.15495/EPub\_UBT\_00006870
- GOULDEN, M.L., J.W. MUNGER, F.-M. FAN, B.C. DAUBE, S.C. WOFYSY, 1996. Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: method and critical evaluation of accuracy. *Global Change Biol.* **2**, 159-168. doi: 10.1111/j.1365-2486.1996.tb00070.x
- JENTZSCH, K., J. BOIKE, T. FOKEN, 2021. Importance of the Webb, Pearman, and Leuning (WPL) correction for the measurement of small CO<sub>2</sub> fluxes. *Atmos. Meas. Tech.* **14**(11), 7291-7296. doi: 10.5194/amt-14-7291-2021

- KOTTEK, M., J. GRIESER, C. BECK, B. RUDOLF, F. RUBEL, 2006. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorol. Z.* **15**, 259-263. doi: 10.1127/0941-2948/2006/0130
- MAUDER, M., T. FOKEN, 2015. Eddy-Covariance software TK3. Zenodo, 10.5281/zenodo.20349 doi: 10.5281/zenodo.20349
- OLIVEIRA, B.R.F., C. SCHALLER, J.J. KEIZER, T. FOKEN, 2021. Estimating immediate post-fire carbon fluxes using the eddy-covariance technique. *Biogeosci.* **18**(1), 285-302. doi: 10.5194/bg-18-285-2021
- OLIVEIRA, B.R.F., J.J. KEIZER, T. FOKEN, 2022. Changes of the aerodynamic characteristics of a flux site after an extensive windthrow. *Biogeosci.* **19**(8), 2235-2243. doi: 10.5194/bg-19-2235-2022
- RUPPERT, J., M. MAUDER, C. THOMAS, J. LÜERS, 2006. Innovative gap-filling strategy for annual sums of CO<sub>2</sub> net ecosystem exchange. *Agric. For. Meteorol.* **138**, 5-18. doi: 10.1016/j.agrformet.2006.03.003
- SCHALLER, C., M. GÖCKEDE, T. FOKEN, 2017. Flux calculation of short turbulent events – comparison of three methods. *Atmos. Meas. Techn.* **10**, 869-880. doi: 10.5194/amt-10-869-2017
- WEBB, E.K., G.I. PEARMAN, R. LEUNING, 1980. Correction of the flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* **106**, 85-100. doi: 10.1002/qj.49710644707

**Keywords:** Wildfire, carbon dioxide flux, dew fall, WPL correction, cumulative NEE

## Irreversible Änderungen im Kohlenstoff- und Wasserhaushalt eines Kiefernwaldes der Oberrheinebene als Folge wiederholter sommerlicher Dürren

*Andreas Christen*<sup>1</sup>, *Simon Haberstroh*<sup>2</sup>, *Fabio Scarpa*<sup>2</sup>, *Jürgen Kreuzwieser*<sup>2</sup>, *Thomas Plapp*<sup>1</sup>, *Dirk Schindler*<sup>1</sup>, *Thomas Seifert*<sup>3</sup>, *Christiane Werner*<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Professur für Umweltmeteorologie, Fakultät für Umwelt und Natürliche Ressourcen, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg (Deutschland)

<sup>2</sup> Professur für Ökosystemphysiologie, Fakultät für Umwelt und Natürliche Ressourcen, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg (Deutschland)

<sup>3</sup> Professur für Waldwachstum und Dendroökologie, Fakultät für Umwelt und Natürliche Ressourcen, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg (Deutschland)

Die außergewöhnliche Häufung von trockenen und heißen Sommern der letzten Jahre in Deutschland führte zu irreversiblen Schäden in vielen Waldökosystemen. In dieser Präsentation beschreiben wir die Veränderungen im Kohlenstoff- und Wasserhaushalt eines durch Trockenheit geschädigten Kiefernwaldes (*P. sylvestris*) am ICOS Ökosystemstandort Hartheim (DE-Har) in der Oberrheinebene.

Aufgrund ungünstiger standortspezifischer Bedingungen, hoher sommerlicher Lufttemperaturen und wiederholter Trockenheit kam es in den letzten 10 Jahren, und insbesondere nach dem Sommer 2018, in DE-Har zu einem massiv beschleunigten Baumsterben im Hauptbestand. Im Jahr 2019 waren etwa 23 %, im September 2020 etwa 47 aller *P. sylvestris*-Bäume (n = 368) abgestorben. Wir nutzen Daten von Turm-basierten Eddy Kovarianz Messungen und kombinieren diese mit ökophysiologischen Messungen auf Einzelbaum-Ebene, um die Auswirkungen der Dürre auf die Kohlenstoff- und Wasserflüsse des Waldes sowie auf die Wechselwirkungen zwischen Laubbäumen (*Carpinus betulus*) und *P. sylvestris* zu quantifizieren. Wir zeigen anhand von Eddy-Kovarianz-Daten, dass die Aufnahme im Sommer (JJA) nur noch etwa 40 % der Werte vor der Dürre erreicht und der Waldstandort im Jahresgang nahezu kohlenstoffneutral ist, wobei vor 15 Jahren der Wald noch eine beachtliche CO<sub>2</sub> Senke war. Aufgrund der Trockenschäden hat der Standort einen Regimewechsel erfahren, bei dem die erhöhte Licht- und Wasserverfügbarkeit unter den Baumkronen das Wachstum der bereits vorhandenen Laubbäume im Unterholz beschleunigte, während sich das kieferndominierte Kronendach weiter lichtete.

Ökophysiologische Messungen im Sommer 2023 zeigen deutlich auf, dass die Laubbäume (*Carpinus betulus*) im Unterwuchs eine signifikant höhere Transpiration, sowie generelle ökophysiologische Aktivität aufweisen im Vergleich zu den vormals dominierenden *P. sylvestris* Bäumen. Die Veränderungen an diesem extremen Trockenstandort können Aussagen liefern, wie Wälder in Deutschland Kippunkte erreichen, und wie sie darauf ökophysiologisch reagieren.

## **Der Einfluss von Waldstrukturen auf lokale Luft- und Bodenklimafaktoren – eine Projektvorstellung**

*Barbara Brunschweiger, Peter Annighöfer*

Professur für Wald- und Agroforstsysteme, Technische Universität München, Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 2, 85354 Freising (Deutschland)

Die länger anhaltenden Trockenheitsphasen der letzten Jahre haben deutschlandweit zu einem bisher nicht dagewesenen Ausmaß an Baumsterben geführt. Als Folge beschleunigt sich der Waldumbau stark. Die Forst- und Holzwirtschaft setzen als Konsequenz auf stärker strukturierte Bestände, um den Folgen der Trockenheit und Hitze zu begegnen. Es wurde bereits mehrfach belegt, dass Wälder im Vergleich zur waldfreien Umgebung Temperaturextreme abpuffern. Welche Wirkung verschiedene Waldstrukturen auf das Mikroklima haben, wurde bislang aber wenig berücksichtigt.

Dieses Projekt untersucht den Einfluss horizontal und vertikal differenzierter Waldstrukturen auf Faktoren des Luft- und Bodenklimas. Dazu werden verschiedene Waldstrukturszenarien definiert, bei denen der Hauptbestand entweder aus der einheimischen Kiefer *Pinus sylvestris* im Reinbestand oder in Mischung mit Laubholz besteht. In beiden Hauptbestandszenarien wird das Fehlen oder Vorhandensein eines dichten Unterwuchses in den Nebenbeständen berücksichtigt.

Je Waldstruktur wurden zehn Versuchsflächen in einem Forst bei Linde im westlichen Havelland in Brandenburg angelegt. Brandenburg gilt als eines der trockensten Gebiete Deutschlands und ist besonders gefährdet von extremen Dürreereignissen. Die Einordnung der strukturellen Komplexität der Vegetation auf den Versuchsflächen basiert auf einer Kombination aus dreidimensionalen Daten mittels terrestrischem Laserscanning, einer Bewertung der Baumartenvielfalt und einer Klassifikation der Lichtverhältnisse mit hemisphärischen Fotos. Seit Juli 2023 werden in jeder Versuchsfläche Lufttemperatur und -feuchtigkeit, sowie Bodentemperatur und -feuchtigkeit kontinuierlich erfasst. Anhand dieser Parameter können Rückschlüsse auf ober- und unterirdische kleinstandörtliche Unterschiede der untersuchten Versuchsflächen gezogen werden.

## 5.2 Poster

### Auswirkungen extremer Windgeschwindigkeiten und anderer Faktoren auf Baumsturz entlang von Bahnlinien

*Henrike Lorenz<sup>1</sup>, Nico Becker<sup>1</sup>, Barry Gardiner<sup>2</sup>, Uwe Ulbrich<sup>1</sup>, Marc Hanewinkel<sup>2</sup>, Benjamin Schmitz<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Freie Universität Berlin (Deutschland)

<sup>2</sup>Universität Freiburg (Deutschland)

<sup>3</sup>Deutsche Bahn (Deutschland)

Hohe Windgeschwindigkeiten sind eine der Hauptursachen für Baumschäden, aber ihre Auswirkungen hängen mit Compound-Ereignissen und vorausgehenden meteorologischen Bedingungen wie hohen Niederschlägen, hoher Bodenfeuchtigkeit oder Bodenfrost zusammen. Um diese Zusammenhänge zu verstehen, ist eine Untersuchung der relevanten meteorologischen Faktoren und Prozesse erforderlich.

Baumschäden sind nicht nur ein Verlust für die Forstwirtschaft, sondern können auch zu Schäden und Verspätungen im Bahnverkehr führen. Deshalb dokumentiert die Deutsche Bahn seit 2017 Baum- und Astfallereignisse entlang des Streckennetzes. In unserer Studie haben wir ein logistisches Regressionsmodell auf diesen Datensatz für die Jahre 2017 bis 2021 angewandt, um relevante Wetterfaktoren, ihre Kombinationen und ihre Auswirkungen auf das winterliche Baumsturzrisiko zu ermitteln. Als meteorologische Daten wurden ERA5-Reanalyse- und RADOLAN-Radardaten verwendet.

Während die tägliche maximale Böengeschwindigkeit der stärkste Risikofaktor ist, erhöhen die tägliche Dauer starker Windgeschwindigkeiten, der Niederschlag, das Bodenwasservolumen, die Luftdichte und die Niederschlagssumme des Vorjahres ebenfalls das Baumsturzrisiko. Die Verwendung von Interaktionstermen zwischen den maximalen Böengeschwindigkeiten und der Sturmdauer sowie des Böenfaktors verbessert die Modellleistung. Dementsprechend zeigen unsere Ergebnisse, dass hohe und langanhaltende Windgeschwindigkeiten, insbesondere in Kombination mit feuchten Bedingungen (hoher Niederschlag und hohes Bodenwasservolumen) und einer hohen Luftdichte, das Baumsturzrisiko erhöhen. Die Einbeziehung von meteorologischen Parametern in Relation zu lokalen klimatologischen Bedingungen (durch Anomalien oder lokale Perzentile) verbesserte die Modellgenauigkeit. Dies zeigt, wie wichtig es ist, die Anpassung von Bäumen an ihre Umgebung zu berücksichtigen.

In weiteren Schritten wollen wir dieses Baumsturzmodell erweitern und verbessern, indem wir sommerliche Baumsturzereignisse und für den Sommer relevante meteorologische Bedingungen wie Gewitter, Trockenheit und Hitze mit einbeziehen. Außerdem planen wir, Baum-spezifische Unterschiede in der Vulnerabilität, etwa zwischen Nadel- und Laubbäumen, zu untersuchen.

## 6 Liste der Moderatoren und Vortragenden

	Seite
<b>Arzberger, Sophie</b> Technische Universität München, (Deutschland) <a href="mailto:sophie.arzberger@tum.de">sophie.arzberger@tum.de</a>	21
<b>Assmann, Denise</b> DWD (Deutschland) <a href="mailto:denise.assmann@dwd.de">denise.assmann@dwd.de</a>	59
<b>Baumüller, Jürgen</b> Universität Stuttgart, Institut für Landschaftsplanung und Ökologie (Deutschland) <a href="mailto:juergen.baumueller@web.de">juergen.baumueller@web.de</a>	12
<b>Böhnke, Denise</b> Karlsruher Institut für Technologie (KIT) (Deutschland) <a href="mailto:denise.boehnke@kit.edu">denise.boehnke@kit.edu</a>	32
<b>Böttcher, Falk</b> DWD (Deutschland) <a href="mailto:falk.boettcher@dwd.de">falk.boettcher@dwd.de</a>	71
<b>Briegel, Ferdinand</b> Albert-Ludwigs-Universität Freiburg (Deutschland) <a href="mailto:ferdinand.briegel@meteo.uni-freiburg.de">ferdinand.briegel@meteo.uni-freiburg.de</a>	35
<b>Brunschweiler, Barbara</b> TUM School of Life Sciences (Deutschland) <a href="mailto:barbara.brunschweiler@tum.de">barbara.brunschweiler@tum.de</a>	133
<b>Chmielewski, Frank-M.</b> Humboldt-Universität zu Berlin, Agrarklimatologie (Deutschland) <a href="mailto:chmielew@agrar.hu-berlin.de">chmielew@agrar.hu-berlin.de</a>	83
<b>Christen, Andreas</b> Albert-Ludwigs-Universität Freiburg (Deutschland) <a href="mailto:andreas.christen@meteo.uni-freiburg.de">andreas.christen@meteo.uni-freiburg.de</a>	132
<b>Dante, T. Castro</b> GERICS Hamburg (Deutschland) <a href="mailto:dante.castro@hereon.de">dante.castro@hereon.de</a>	112
<b>Doktor, Daniel</b> Helmholtz Centre for Environmental Research – UFZ (Deutschland) <a href="mailto:daniel.doktor@ufz.de">daniel.doktor@ufz.de</a>	88, 126
<b>Epp, Katharina</b> Albert-Ludwigs-Universität Freiburg (Deutschland) <a href="mailto:katharina.m.epp@gmail.com">katharina.m.epp@gmail.com</a>	104
<b>Foken, Thomas</b> Universität Bayreuth (Deutschland) <a href="mailto:thomas.foken@uni-bayreuth.de">thomas.foken@uni-bayreuth.de</a>	48, 131

	Seite
<b>Franceschi, Eleonora</b> Technische Universität München (Deutschland) <a href="mailto:eleonora.franceschi@tum.de">eleonora.franceschi@tum.de</a>	23
<b>García de León, Andrea Sofia</b> Universität Würzburg, Institut für Geographie und Geologie (Deutschland) <a href="mailto:andrea-sofia.garcia-de-leon@uni-wuerzburg.de">andrea-sofia.garcia-de-leon@uni-wuerzburg.de</a>	17
<b>Gehrke, Katrin</b> DWD (Deutschland) <a href="mailto:katrin.gehrke@pecanode.com">katrin.gehrke@pecanode.com</a>	117
<b>Goldberg, Valeri</b> Technische Universität Dresden Meteorologie (Deutschland) <a href="mailto:valeri.goldberg@tu-dresden.de">valeri.goldberg@tu-dresden.de</a>	31
<b>Graw, Kathrin</b> DWD Freiburg (Deutschland) <a href="mailto:kathrin.graw@dwd.de">kathrin.graw@dwd.de</a>	108, 122
<b>Grünwald, Thomas</b> Technische Universität Dresden, Meteorologie (Deutschland) <a href="mailto:thomas.gruenwald@tu-dresden.de">thomas.gruenwald@tu-dresden.de</a>	127
<b>Hoffmann, Peter</b> GERICS Hamburg (Deutschland) <a href="mailto:peter.hoffmann@hereon.de">peter.hoffmann@hereon.de</a>	47
<b>Hübner, Thomas</b> GeoSphere Austria (Österreich) <a href="mailto:thomas.huebner@geosphere.at">thomas.huebner@geosphere.at</a>	82
<b>Jetschni, Johanna</b> Kath. Universität Eichstätt-Ingolstadt (Deutschland) <a href="mailto:johanna.jetschni@ku.de">johanna.jetschni@ku.de</a>	87
<b>Jochner-Oette, Susanne</b> Kath. Universität Eichstätt-Ingolstadt (Deutschland) <a href="mailto:susanne.jochner@ku.de">susanne.jochner@ku.de</a>	81
<b>Kaul, Nadine</b> Uni Hamburg (Deutschland) <a href="mailto:nadine.kaul@uni-hamburg.de">nadine.kaul@uni-hamburg.de</a>	50
<b>Kauke, Nicole</b> LANUV (Deutschland) <a href="mailto:nicole.kauke@lanuv.nrw.de">nicole.kauke@lanuv.nrw.de</a>	99
<b>Lenz, Johanna</b> HNLUG (Deutschland) <a href="mailto:johanna.lenz@hlnug.hessen.de">johanna.lenz@hlnug.hessen.de</a>	99

	Seite
<b>Leppelt, Thomas</b> DWD Offenbach (Deutschland) <a href="mailto:thomas.leppelt@dwd.de">thomas.leppelt@dwd.de</a>	75
<b>Lorenz, Henrike</b> FU Berlin (Deutschland) <a href="mailto:rike.lorenz@fu-berlin.de">rike.lorenz@fu-berlin.de</a>	134
<b>Ludwig, Svenja</b> DWD Freiburg (Deutschland) <a href="mailto:svenja-ludwig@dwd.de">svenja-ludwig@dwd.de</a>	121
<b>Moderow, Uta</b> Technische Universität Dresden (Deutschland) <a href="mailto:uta.moderow@tu-dresden.de">uta.moderow@tu-dresden.de</a>	49
<b>Mücke, Hans-Guido</b> UBA Berlin (Deutschland) <a href="mailto:hans-guido.muecke@uba.de">hans-guido.muecke@uba.de</a>	101
<b>Nordt, Birgit</b> FU Berlin (Deutschland) <a href="mailto:b.nordt@bo.berlin">b.nordt@bo.berlin</a>	89
<b>Oberhardt, Felix</b> Uni Oldenburg (Deutschland) <a href="mailto:felix.oberhardt@uni-oldenburg.de">felix.oberhardt@uni-oldenburg.de</a>	43
<b>Posada, Rafael</b> DWD Offenbach (Deutschland) <a href="mailto:rafael.posada-navia-osorio@dwd.de">rafael.posada-navia-osorio@dwd.de</a>	96
<b>Queck, Ronald</b> Technische Universität Dresden (Deutschland) <a href="mailto:ronald.queck@tu-dresden.de">ronald.queck@tu-dresden.de</a>	40
<b>Rahmann, Mohammad</b> Technische Universität München (Deutschland) <a href="mailto:ma.rahman@tum.de">ma.rahman@tum.de</a>	41
<b>Rauschkolb, Robert</b> Deutsches Zentrum für Integrative Biodiversitätsforschung Jena (Deutschland) <a href="mailto:robert.rauschkolb@uni-jena.de">robert.rauschkolb@uni-jena.de</a>	93
<b>Reischl, Astrid</b> Technische Universität München (Deutschland) <a href="mailto:astrid.reischl@tum.de">astrid.reischl@tum.de</a>	27
<b>Rubel, Franz</b> Veterinärmedizinische Universität Wien (Österreich) <a href="mailto:franz.rubel@vetmeduni.ac.at">franz.rubel@vetmeduni.ac.at</a>	113

	<b>Seite</b>
<b>Schauberger, Günther</b> Veterinärmedizinische Universität Wien (Österreich) <a href="mailto:Gunther.schauberger@vetmeduni.ac.at">Gunther.schauberger@vetmeduni.ac.at</a>	67
<b>Scheifinger, Helfried</b> GeoSphere Austria (Österreich) <a href="mailto:helfried.scheifinger@geosphere.at">helfried.scheifinger@geosphere.at</a>	77
<b>Simon, Jonathan</b> Universität Augsburg (Deutschland) <a href="mailto:jonathan.simon@uni-a.de">jonathan.simon@uni-a.de</a>	42
<b>Spank, Uwe</b> Technische Universität Dresden (Deutschland) <a href="mailto:uwe.spank@tu-dresden.de">uwe.spank@tu-dresden.de</a>	63
<b>Sühring, Matthias</b> pecanode GmbH (Deutschland) <a href="mailto:matthias.suehring@pecanode.com">matthias.suehring@pecanode.com</a>	46
<b>Thaler, Sabina</b> Universität für Bodenkultur Wien (Österreich) <a href="mailto:sabina.thaler@boku.ac.at">sabina.thaler@boku.ac.at</a>	51, 78
<b>Yigit, Ali</b> Humboldt-Universität zu Berlin, Agrarklimatologie (Deutschland) <a href="mailto:ali.yigit@hu-berlin.de">ali.yigit@hu-berlin.de</a>	56
<b>Ziemann, Astrid</b> TU Dresden, Meteorologie (Deutschland) <a href="mailto:astrid.ziemann@tu-dresden.de">astrid.ziemann@tu-dresden.de</a>	39
<b>Zimmer, Matthias</b> LFU RLP (Deutschland) <a href="mailto:matthias.zimmer@lfu.rlp.de">matthias.zimmer@lfu.rlp.de</a>	99

## 7 Annalen der Meteorologie

- Nr. 52 9. Fachtagung BIOMET des Fachausschusses Biometeorologie der DMG e.V., 28. - 30. November 2017 in Stralsund.
- Nr. 51 7th International Verification Methods Workshop: 03.-11. May 2017 in Berlin, Germany; Programme and Abstracts
- Nr. 50 Wetter und Wissen in der Reformationszeit: in Facetten und Beispielen; Katalog zur Ausstellung der Deutschen Meteorologischen Bibliothek, 16. Oktober bis 17. November 2017. 2017
- Nr. 49 10. Annaberger Klimatage 2016, 11. - 12. Mai 2016 in Annaberg-Buchholz; Tagungsband mit Beiträgen anlässlich der Gründung der Wetterwarte Fichtelberg vor 100 Jahren. 2016
- Nr. 48 Phenology 2015: Third International Conference on Phenology, 5.-8. October 2015, Kusadasi (Turkey), Programme and Abstracts. 2015
- Nr. 47 METTOOLS IX: Programm, Übersicht, Kurzbeiträge. Tagung des Fachausschusses Umweltmeteorologie FAUMET der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft DMG e.V. vom 17. bis 19. März 2015 in Offenbach (Main). 2015
- Nr. 46 Goethes weiteres Erbe: 200 Jahre Klimastation Jena (Beiträge des Jubiläumskolloquiums „200 Jahre Klimamessstation Jena“. 2013
- Nr. 45 125 Jahre Wetterstation Geisenheim 1884 - 2009 (Jubiläumsband mit Beiträgen aus der agrarmeteorologischen Forschung und Beratung). 2009
- Nr. 44 Programme & Extended Abstracts, 30th International Conference on Alpine Meteorology: 11-15 May 2009, Badnerhalle, Rastatt, Germany. 2009
- Nr. 43 125 Jahre Deutsche Meteorologische Gesellschaft, :Festveranstaltung am 7. November 2008 in Hamburg. 2008
- Nr. 42 50 Jahre Überwachung der Radioaktivität in der Atmosphäre durch den Deutschen Wetterdienst: Festveranstaltung am 8. - 9. Juni 2005, Langen, Deutschland. 2006
- Nr. 41 17th International Congress of Biometeorology - ICB 2005. 2005
- Nr. 40 SIRWEC 2004 - 12th International Road Weather Conference, Bingen. 2004, CD-ROM
- Nr. 39 4. Fachtagung BIOMET (19. - 20. April 1999 in München) des Fachausschusses BIOMET der DMG gemeinsam mit der Gesellschaft zur Förderung Medizin-Meteorologischer Forschung e. V. 1999
- Nr. 38 Herbstschule Radarmeteorologie 1998 vom 2. bis 6. November in Oberpfaffenhofen. 1998
- Nr. 37 Deutsche Meteorologen-Tagung vom 14. bis 18. September 1998 in Leipzig, Band 1 und 2. 1998

**Gesamtliste der „Annalen der Meteorologie“ unter [www.dwd.de/bibliothek](http://www.dwd.de/bibliothek).**



**Deutscher Wetterdienst**  
Bildungszentrum Selbstverlag  
Am DFS Campus 4  
63225 Langen