

# RessortForschtKlima

## Ergebnisse aus drei Jahren Forschung für mehr Klimaschutz in Landwirtschaft, Wald und Ernährung

Abschlussbericht – Dezember 2025



Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Landwirtschaft, Ernährung  
und Heimat

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Beteiligte Ressortforschungsinstitute und Herausgeber:



### **Friedrich-Loeffler-Institut (FLI)**

Südufer 10  
17493 Greifswald-Insel Riems  
T: +49 38351 7-0



### **Julius Kühn-Institut (JKI)**

Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen  
Erwin-Baur-Str. 27  
06484 Quedlinburg  
T: +49 3946 47-0



### **Max Rubner-Institut (MRI)**

Bundesforschungsinstitut für Ernährung und Lebensmittel  
Haid-und-Neu-Str. 9  
76131 Karlsruhe  
T: +49 721 6625 0



### **Thünen-Institut**

Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei  
Bundesallee 50  
38116 Braunschweig  
T: +49 531 596 1003

## **Zitiervorschlag:**

RessortForschtKlima (2025)

Ergebnisse aus drei Jahren Forschung für mehr Klimaschutz in Landwirtschaft, Wald und Ernährung:

Abschlussbericht der RessortForschtKlima-Projekte. <https://doi.org/10.3220/253-2025-220>

## **Bildrechte Titelseite:**

Doreen König, Julius Kühn-Institut

Dirk von Soosten, Friedrich-Loeffler-Institut

Max Rubner-Institut

Tania Runge, Thünen-Institut



© Die Autoren / Die Autorinnen.

Dieses Werk wird unter den Bedingungen der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (CC BY 4.0) zur Verfügung gestellt

(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>).

## Inhaltsverzeichnis

Editorial.....	1
VKP.....	3
NEMUR .....	5
ÖTiKlis .....	7
KlimaN .....	11
KlimZucht.....	15
NORA .....	17
PRoKlima.....	20
CatchHedge .....	23
KlimaFFolgen .....	26
KlimaGetreide.....	30
SORGHUM .....	33
WurCel .....	37
AVoiD .....	40
CaberNET .....	44
ENKL.....	47
TRIP .....	51
HoFaTo.....	55
MOCOR .....	59
RoVer .....	62
AnAKHon.....	66
KLIMAtiv.....	68
CliMax .....	72
Solarnützlinge .....	76
TREND:LR .....	78
WAKS .....	81
KlimaFern.....	84
KoBoS.....	88

## Editorial

Die Landwirtschaft und der LULUCF Sektor trugen in Deutschland im Jahr 2024 zusammen zu rund 15 Prozent der Treibhausgasemissionen bei. Im Jahr 2024 stammten gut 9 % der gesamten Emissionen in Deutschland aus der Landwirtschaft. Von heute 62 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalent sollen die Emissionen aus der Landwirtschaft bis 2030 laut Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) auf maximal 56 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq abnehmen. Während in den Jahren 2020 bis 2023 in der Landwirtschaft ein leichter Rückgang um insgesamt 0,6 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq erreicht wurde, hat sich der Bereich Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF) von einer Kohlenstoffsénke zu einer Emissionsquelle entwickelt. Somit sind weitere Anstrengungen zur Emissionsreduktion in den Bereichen Landwirtschaft und Wald erforderlich, um die Klimaziele Deutschlands zu erreichen. Insgesamt ist festzustellen, dass sich Forschung in den Bereichen Landwirtschaft, Wald und Ernährung noch stärker mit nachhaltigen und Klimaschutz-relevanten Themen und Handlungsfeldern und dazu bestehenden Herausforderungen beschäftigt und hierzu die gesamte Wertschöpfungskette von der Züchtung und Erzeugung bis zum Konsumenten in den Blick genommen werden muss.

Mit „RessortForschtKlima“ wurde ein Verbund aus 27 Forschungsprojekten geschaffen, in dem die vier Ressortforschungseinrichtungen im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Landwirtschaft, Ernährung und Heimat (BMLEH) drei Jahre gemeinsam zur Stärkung des Klimaschutzes geforscht haben. Der Verbund hatte die Aufgabe, wissenschaftliche Erkenntnisse zu generieren und aufzuzeigen, wo und durch welche Maßnahmen die THG-Emissionen in der Landwirtschaft und im Ernährungsverhalten in Deutschland reduziert und Kohlenstoffsénken durch eine veränderte Landnutzung erschlossen werden können. Im Vordergrund von RessortForschtKlima stand, einen Beitrag zur Erreichung der Klimaschutzziele zu leisten, indem die Forschungsergebnisse zur Verbesserung der Klimaschutzberichterstattung, zur besseren Erfassung und Bewertung von Klimaschutzmaßnahmen oder neuen Ideen und Innovationen beitragen.

Die im Rahmen des Klimaschutz-Sofortprogramms 2022 geförderten RessortForschtKlima-Projekte mit einer Laufzeit bis Ende 2025 decken ein breites Spektrum an Forschungsfragen ab, die über Institutsgrenzen hinweg interdisziplinär am Julius Kühn-Institut (JKI), Friedrich-Loeffler-Institut (FLI), Max Rubner-Institut (MRI) und Thünen-Institut untersucht wurden. Es galt wirksame, an die Standortbedingungen in Deutschland angepasste und nachhaltige Lösungen zur Minderung von Emissionen, einschließlich des Ernährungsverhaltens, und zur aktiven Unterstützung des Managements von Kohlenstoffsénken zu entwickeln. Neben dem Hauptfokus auf geeignete Klimaschutzmaßnahmen wurden außerdem Lösungen für die Klimaberichterstattung entwickelt, wissenschaftliche Folgenabschätzungen durchgeführt und sozioökonomische Fragestellungen untersucht.

Im Rahmen von RessortForschtKlima werden innovative Lösungen zur effektiven Reduktion von THG-Emissionen in der Pflanzen- und Tierproduktion und zur Erschließung von Kohlenstoff-Sequestrierungspotenzialen erforscht und entwickelt. Die Forschungsaktivitäten umfassen die gesamte landwirtschaftliche Produktionskette und adressieren die Bereiche Erhöhung der Kohlenstoffspeicherpotenziale, nachhaltige Reduzierung von THG-Emissionen einschließlich der Entwicklung und Umsetzung alternativer Nutzungskonzepte und -methoden bis hin zum Ernährungsverhalten als Beitrag zum Klimaschutz. Die Ergebnisse sollen dazu beitragen, übergreifende Klimaschutzmaßnahmen und -ziele zeitnah und effektiver zu erreichen. Die entwickelten Maßnahmen sollen dabei möglichst einfach in der landwirtschaftlichen Praxis umsetzbar und in ihrer Wirkung quantifizierbar sein.

Die Projekte sind folgenden acht Themenschwerpunkten zugewiesen:

- Verringerung der Treibhausgas-Emissionen in der Tierhaltung (2 Projekte: NEMUR, ÖTiKliS)
- Erhöhung der Ressourceneffizienz und Senkung der Stickstoffüberschüsse (4 Projekte: KlimaN, KlimZucht, NORA, PRoKlima)
- Humuserhalt und -aufbau in Ackerland (5 Projekte: CatchHedge, KlimaFFolgen, KlimaGetreide, SORGHUM, WurCel)
- Emissionsreduktion entlang der Wertschöpfungskette, einschließlich des Ernährungsverhaltens (4 Projekte: AVoiD, CaberNET, ENKL, TRIP)

- Klimaschutz durch Vernässung von Moorböden und Reduzierung der Torfnutzung (3 Projekte: HoFaTo, MOCOR, RoVer)
- Nachhaltige Waldbewirtschaftung und Holznutzung (2 Projekte: AnAKHon, KLIMAtiv)
- Klimaschutz in weiteren Landschaftsräumen (4 Projekte: CliMax, Solarnützlingle, TREND:LR, WAKS)
- Fernerkundung für die Treibhausgas-Berichterstattung (2 Projekte: KlimaFern, KoBoS)

Im Folgenden stellen die Projekte im Project Brief-Format ihre zentralen Forschungsfragen und -ergebnisse vor. Die wichtigsten Projektziele und Ergebnisse werden kurz und knapp dargelegt und die Projekthighlights zusammengefasst. Weitere Hinweise zu Veröffentlichungen im Rahmen des Projektes laden zur Vertiefung in die Ergebnisse ein.

Claudia Heidecke, Til Feike, Marisa Paus, Sara Kranz, Jens Schell, Tania Runge

VKP-Projektteam

## Stärkung von Vernetzung und Kooperation im RessortForschtKlima-Verbund

**Tania Runge und Claudia Heidecke (Thünen-Institut); Marlene Bittner, Marisa Paus und Til Feike (Julius Kühn-Institut); Sara Kranz (Max Rubner-Institut); Jens Schell (Friedrich-Loeffler-Institut)**

### ZIELSETZUNG

Das Vernetzungs- und Koordinierungsprojekt (VKP) führte als übergreifendes Gremium aus den vier Ressortforschungsinstituten die Ergebnisse der RessortForschtKlima-Projekte zu einem Gesamtbild zusammen. Die 27 Projekte im Verantwortungsbereich des Bundesministeriums für Landwirtschaft, Ernährung und Heimat (BMLEH) untersuchten Ansätze zur Treibhausgasminderung sowie zur Schaffung von Kohlenstoffsenken in den Bereichen Landwirtschaft, Wald und entlang der Wertschöpfungskette einschließlich der Ernährung. Sie adressieren ein breites Spektrum an Klimaschutzmaßnahmen, liefern Beiträge zur wissenschaftlichen Folgenabschätzung sowie zur Klimaberichterstattung und zu sozioökonomischen Fragen. Dabei bauen sie auf teilweise langjähriger Forschungsarbeit auf. Dieses komplementäre Wissen der Ressortforschungseinrichtungen galt es im Rahmen dieses Verbundes noch zu vertiefen und auszubauen.

### METHODIK

Das VKP war verantwortlich, die Sichtbarkeit als Verbund sicherzustellen sowie die einmal jährlich stattfindenden Treffen mit Beteiligung aller 27 Projekte zur Vernetzung und zum wissenschaftlichen Austausch zu organisieren und durchzuführen.

Zu den Aufgaben im VKP gehörte auch die Bündelung von Zwischen- und Endergebnissen der Projekte sowie deren Aufarbeitung für Politik und Öffentlichkeit, u. a. über eine eigene Webseite, mit dem Ziel den wissenschaftlichen Fortschritt zu dokumentieren und relevante Ergebnisse und neue Erkenntnisse bereitzustellen. Das VKP begleitete alle Projekte inhaltlich, insbesondere im Hinblick darauf, ob und wie umfänglich (potenzielle) Klimaschutzwirkungen quantifiziert und in der Treibhausgasberichterstattung abgebildet werden können.

Dem internationalen Austausch diente zudem die Ausrichtung des „International Research Symposium on Agricultural Greenhouse Gas Mitigation. From Research to Implementation (AgriGHG-2024)“ vom 21.–23.10.2024 in Berlin.

Das VKP unterstützte zudem die Backweizeninitiative des BMLEH, die zum Ziel hat, die Treibhausgasemissionen im Backweizen Sektor durch eine verbesserte Zusammenarbeit entlang der gesamten Wertschöpfungskette zu reduzieren. Beim Austausch von Vertreter\*innen aus Landwirtschaft, Handel, Mühlen, Bäckereien und Forschung trug das VKP Projekt durch Beiträge bei.

### ERGEBNISSE

Die Webseite [ressortforschtklima.de](https://ressortforschtklima.de) dient der Kurzvorstellung aller 27 Klimaschutz-Projekte sowie als zentraler Zugang zu Veröffentlichungen, die aus den Projekten hervorgegangen sind und noch folgen werden.

### HIGHLIGHTS

- Kurzvorstellung aller Projekte sowie deren Veröffentlichungen auf [ressortforschtklima.de](https://ressortforschtklima.de)
- Organisation und Durchführung des internationalen [AgriGHG-2024 Symposiums](https://ressortforschtklima.de) mit Beteiligung von CGIAR und GRA mit 200 Teilnehmenden

Gelegenheit für den direkten Austausch zwischen den Projekten des RessortForschtKlima-Verbundes boten die drei Vernetzungstreffen in 2023, 2024 und 2025. Vielfältige Formate wie Project Pitches, Posterausstellungen, World Café, Speed-Networking, Open Space Sessions und die Besichtigung von Feldversuchen wurden von den Projektmitwirkenden intensiv genutzt. Neben der Entwicklung eines gemeinsamen Verständnisses zum Beitrag der eigenen Forschung zum Klimaschutz, wurde die interdisziplinäre Vernetzung zwischen Projekten und Ressortforschungseinrichtungen gezielt unterstützt und vielversprechende Synergien identifiziert (s. Abb. 1). Synergien ergaben sich u. a., durch eine ergänzende Datennutzung für die Berechnung und Modellierung der THG-Minderungspotenziale durch verbesserte Systeme. Daneben wurden Analyseergebnisse aus der Fernerkundung zur Landnutzung für unterschiedliche Fragestellungen genutzt.

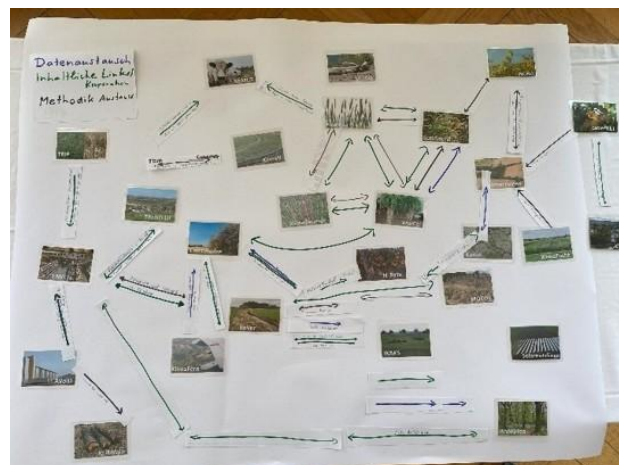


Abbildung 1: Visualisierung des Austauschs zu Inhalten, Daten und Methoden innerhalb des RessortForschtKlima-Verbundes ©T. Runge/Thünen-Institut

Bei der erfolgreichen Teilnahme an der DAFA-Klimakonferenz „Agrarforschung zum Klimawandel“, die vom 11.–14.03.2024 in Potsdam stattfand, gaben 16 RessortForschtKlima-Projekte Einblicke in ihre Forschungsergebnisse. Im Sinne der Zusammenführung des Forschungsstands wurden zudem zwei Sessions zu den Themen „Steuerung der Stickstoff-Düngung (63)“ und zu „Klimaschutz in der Pflanzenproduktion bewerten – Indikatoren und Herausforderungen (68)“ seitens des VKP organisiert.



## KLIMAWIRKUNG

Die deutschen Klimaziele und die gestiegenen Anforderungen an die Landwirtschaft und den LULUCF-Sektor erfordern neue Lösungen und Innovationen, die unter anderem von verstärkter Forschung initiiert werden können. Benötigt werden Verbesserungen für die Klimaberichterstattung, wissenschaftliche Folgenabschätzungen von Maßnahmen, die wissenschaftliche Begleitung und Weiterentwicklung laufender Maßnahmen sowie die sozio-ökonomische Forschung zur Begleitung von Vorhaben. Jedes der RessortForschtKlima-Projekte leistet einen Beitrag zu mindestens einem dieser vier Aspekte. Wenn es um die Betrachtung der Klimaschutzwirkung und THG-Minderung geht, nehmen Forschungsprojekte eine Sonderstellung ein. Nur in den seltensten Fällen werden tatsächliche Emissionsminderungen durch die Projekte selbst ausgelöst. Zu potenziellen Klimawirkungen wird in den einzelnen Project Briefs berichtet.

Das internationale AgriGHG-2024 Symposium wurde maßgeblich über das VKP-Projekt gestaltet. Es fand unter der Schirmherrschaft des BMLEH und in Zusammenarbeit mit CGIAR und GRA statt. Mehrere Kolleg\*innen aus den RessortForschtKlima-Projekten nutzten die Gelegenheit, um ihre Arbeiten international führenden Wissenschaftler\*innen vorzustellen und mit ihnen zu diskutieren. Im Anschluss an die Veranstaltung wurde im Rahmen des VKP-Projektes ein Book of Abstracts der AgriGHG-2024 erstellt, das mit seinen Beiträgen aus mehr als 40 Ländern einen Überblick über den internationalen Forschungsstand zu Klimaschutz in der Landwirtschaft gibt.



Abbildung 2: Gruppenbild der Teilnehmenden des AgriGHG-2024 Symposiums; ©N. Zirbes/Thünen-Institut



Abbildung 3: Gruppenbild der Teilnehmenden des abschließenden Vernetzungstreffens; ©A. Shawon/Julius Kühn-Institut

## SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die gezielte Erhöhung der Klimaschutzleistung in Land-, Forstwirtschaft und Ernährung erfordert eine enge Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft, Politik, Wirtschaft und Gesellschaft. Die erfolgte Förderung von Forschung und Entwicklung im Rahmen von RessortForschtKlima hat wichtige Erkenntnisse und Lösungen für THG-Minderung und Kohlenstoffsteigerung geleistet und unterstützt so zukünftige Maßnahmen und Politikinstrumente für den Klimaschutz in Deutschland. So wurden innovative Lösungen von der Züchtung, über den Anbau und verbesserte Landnutzung bis zur Lagerung, Verarbeitung und Konsum identifiziert und entwickelt, die nicht nur das Klima schützen, sondern auch die gesellschaftlichen Bedürfnisse berücksichtigen. Das VKP hat dabei die Vernetzung zwischen Wissenschaftler\*innen über Projekt-, Instituts- und Ressortforschungseinrichtungsgrenzen hinweg gefördert und damit eine wichtige Grundlage für die zukünftige noch effektivere Zusammenarbeit zur Entwicklung von Klimaschutzlösungen im Geschäftsbereich des BMLEH gelegt.

## AUSGEWÄHLTE VERÖFFENTLICHUNGEN

- Heidecke C et al. (eds) (2024): Book of Abstracts. International Research Symposium on Agricultural Greenhouse Gas Mitigation - From Research to Implementation; Thünen Working Paper 251, doi. 10.3220/WP1731925265000
- Runge T, Heidecke C, Laquai V (2024): Stickstoffdüngung als zentrale Stellschraube für klimafreundliches Brotgetreide. In: Köchy M (ed) Agrarforschung zum Klimawandel: Konferenz der Deutschen Agrarforschungsallianz, S.256. doi. 10.3220/DAFA1713767287000
- Paus M, Feike T (2025): Klimaschutz entlang der pflanzenbaulichen Produktionskette – Stellschrauben, Potenziale und Herausforderungen. Posterbeitrag auf der 65. Tagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften

## Weitere Informationen:

[www.ressortforschtklima.de](http://www.ressortforschtklima.de)



## Handlungsempfehlungen für Politik und Praxis

Dialog, Austausch und interdisziplinäre Zusammenarbeit sind wichtig, um einheitliche Standards sicherzustellen und mögliche Synergien zwischen Projekten und Aktivitäten zu befördern. Gerade die Institutions-übergreifende Zusammenarbeit kann besonders fruchtbar sein, dies erfordert jedoch zusätzliche Anstrengungen.

Ein abgestimmtes methodisches Vorgehen und der gemeinsame Zugriff auf öffentliche bzw. leicht verfügbare Datensätze ist für die Klimaschutzforschung, ebenso wie für eine wissenschaftlich fundierte und transparente THG-Berichterstattung von Bedeutung.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Landwirtschaft, Ernährung  
und Heimat

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

### Nachhaltige Emissionsmodelle für eine Umweltverträgliche Rinderfütterung

Dirk von Soosten, Markus Peschel, Christin Unruh, Patricia Mertens, Erik Bannert, Claudia Klein, Johannes Geibel, Ulrich Meyer und Sven Dänicke

#### ZIELSETZUNG

Die Methanemissionen von Milchkühen zählen zu den bedeutendsten Treibhausgasquellen im landwirtschaftlichen Sektor. Eine Reduzierung dieser Emissionen ist angesichts der nationalen und internationalen Klimaziele zwingend erforderlich. Die ruminale Methanogenese steht im engen Zusammenhang mit physiologischen und tiergenetischen Einflussfaktoren und stellt einen wichtigen Indikator für den Energieumsatz sowie für die Effizienz der Nährstoffumsetzung im Pansen dar.

Ziel des Projektes war es, auf Basis ressourcen-schonend hergestellter Futtermittel verschiedene Fütterungsvarianten zu testen, um daraus Schätzgleichungen zur Quantifizierung der Methanemissionen von Milchkühen abzuleiten. Diese sollten neben der Emissionsminderung insbesondere die Tiergesundheit und die ernährungsphysiologischen Erfordernisse berücksichtigen. Darüber hinaus sollten die erhobenen Daten zur Entwicklung klimaschutzrelevanter Fütterungsstrategien genutzt werden, die die komplexen Genotyp-Umwelt-Interaktionen bei der Methanbildung im Pansen berücksichtigen.

#### METHODIK

Im Rahmen des Projektzeitraums standen insgesamt 103 laktierende Milchkühe der Rasse Deutsche Holstein aus der Versuchsstation des Friedrich-Loeffler-Instituts am Standort Braunschweig zur Verfügung. Die Tiere wurden im Laufstall mit Spaltenboden und Hochboxen gehalten. Die Haltung erfolgte unter standardisierten Bedingungen, wobei alle Tiere freien Zugang zu Wasser und einer Teilmischration (Partial Mixed Ration, PMR) hatten, die entsprechend der Rationsgestaltung auch pelletiertes Kraftfutter enthalten konnte.

Die PMR wurde täglich in Wiegetrögen (Insentec B.V., Marknesse, Niederlande), zur Erfassung der tierindividuellen Futteraufnahme, vorgelegt. Die Kraftfutterergänzung erfolgte über Abrufstationen (Insentec B.V., Marknesse, Niederlande) und das GreenFeed-Methanmesssystem (C-Lock Inc., Rapid City, SD, USA). Dieses System ermöglicht eine wissenschaftlich validierte Quantifizierung der Methanemissionen bei Rindern unter praxisnahen Bedingungen, ohne die natürliche Bewegungs- und Futteraufnahmeaktivität der Tiere einzuschränken.



Abbildung 1: GreenFeed Methanmesstation und Wiegetröge zur Messung der tierindividuellen Futteraufnahme. Quelle: Dirk von Soosten

Insgesamt wurden neun Fütterungsdurchgänge durchgeführt, bestehend aus einer dreiwöchigen Adaptationsphase und einer dreiwöchigen Messphase. Die Rationsgestaltung umfasste einen variierenden Kraftfutteranteil sowie variierende Zusammensetzungen der Grobfutterkomponenten. Zur Variation der Rationszusammensetzung wurden unterschiedliche Komponenten eingesetzt (Abb. 2), darunter Luzerne, Hornkleesilage, Koprodukte der Lebensmittelverarbeitung (Biertreber- und Pressschnitzelsilage) und Ackerbohnen sowie Weidegang. Die Ackerbohnen wurden über das Kraftfutter

#### HIGHLIGHTS

- 32 verschiedene Futterrationen einschließlich Weidegang, die über einen Zeitraum von drei Jahren verfüttert wurden, führten zu einer hohen Variabilität der Emissions- und Leistungsparameter von Milchkühen.
- Derzeit werden Gleichungen zur Schätzung der Methanemissionen in landwirtschaftlichen Betrieben und unter wissenschaftlichen Bedingungen abgeleitet, die dazu beitragen könnten, die Methanemissionen in Zukunft zu reduzieren.

verabreicht, während Luzerne, Hornkleesilage und Koprodukte der Lebensmittelverarbeitung in die PMR integriert wurden.

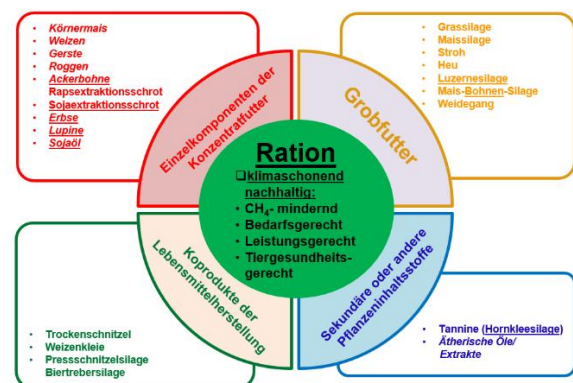


Abbildung 2: Rationsbestandteile im Projekt NEMUR inklusive Leguminosen (unterstrichen)

Während der Messphasen erfolgten die Probenahmen und die umfassende Datenerfassung (Abb. 3). Die Beprobung der Grobfuttermittel erfolgte zweimal wöchentlich, jene der Kraftfutterkomponenten einmal wöchentlich. Über die jeweiligen Phasen wurden die Proben gepoolt und hinsichtlich ihrer Nährstoffgehalte analysiert. Zusätzlich wurden Milchproben, Pansenflüssigkeit, Kot- und Blutproben entnommen, um die Verdauungsphysiologie und Tiergesundheit zu charakterisieren. Sämtliche erhobenen Daten wurden zentral erfasst und für statistische Modellierungen aufbereitet. Darüber hinaus wurden alle Tiere im Versuch zur Identifikation genetischer Einflüsse mittels Illumina-Sequenzierung SNP-genotypisiert. Zusätzlich erfolgte bei 11 Kühen eine Long-Read-Sequenzierung mittels Nanopore-Technologie zur Identifikation struktureller Genomvarianten.

Es wurden unterschiedliche Fütterungsvarianten untersucht, die auf praxisüblichen Futtermitteln basieren, die auch im ökologischen Anbau erzeugt werden können. Dazu wurden Fütterungsdurchgänge mit einer Versuchsdauer von 6 Wochen (3 Wochen Adaptationsphase, 3 Wochen Sammelphase) durchgeführt.



Abbildung 3: Versuchsablauf und Probenahme im NEMUR-Projekt.



## KLIMAWIRKUNG

### Erste Auswertungen zeigen:

- Eine um 1 kg steigende energiekorrigierte Milchleistung reduziert die Methanemissionen pro kg energiekorrigierte Milch um ca. 2 %.
- Rationskohlenhydrate beeinflussen die Methanbildung in unterschiedlicher Richtung: 1 % mehr Stärke in der Ration senkt die Methanemission um ca. 1 %.

## ERGEBNISSE

Die Variation der Rationszusammensetzung, insbesondere der Anteil und die Art der eingesetzten Kraftfutterkomponenten, zeigte deutliche Einflüsse auf die gemessenen Methanemissionen. Die Integration von Koprodukten der Lebensmittelverarbeitung erwies sich als praktikabel und ressourcenschonend, ohne die Futteraufnahme oder Milchleistung maßgeblich zu beeinflussen. Auch die Fütterung von Leguminosen hatte weitgehend keinen Einfluss auf Tiergesundheit oder Leistung.

Auf Grundlage der bisher vorliegenden Datensätze konnte ein erstes Modell zur Schätzung der täglichen ruminalen Methanemission unter Praxisbedingungen entwickelt werden. Eine weiterführende Modellvalidierung ist derzeit aufgrund ausstehender Analyseergebnisse noch nicht möglich, da die Ergebnisse des letzten Projektjahres einbezogen werden müssen.

Für das bisher erstellte Modell haben sich insbesondere folgende Einflussgrößen als bedeutsam herausgestellt:

- Laktationswoche
- Temperature-Humidity-Index (THI)
- Neutral-Detergenzien-Faser (NDF) -Gehalt der Ration
- Umsetzbare Energie (ME) -Gehalt der Ration
- Energiekorrigierte Milchmenge (ECM)
- Laktationsnummer

Weitere Parameter wie Body Condition Score (BCS) und Locomotion Score erwiesen sich als vielversprechend, wurden jedoch bisher aufgrund fehlender Signifikanz ausgeschlossen.

Erste Pedigree-basierte Zwischenauswertungen zur Genetik zeigen, dass ein hoher Anteil der beobachteten Unterschiede auf tierindividuelle Faktoren zurückzuführen ist (26–76 % der Varianz). Für eine Auftrennung in Effekte der permanent auf die Kuh einwirkenden Umwelt sowie Effekte der Genetik werden jedoch noch die finalen Phänotypen sowie Genotypen der Kühe aus dem letzten Versuchsjahr benötigt.

Insgesamt gestaltet sich die Modellbildung aufgrund der vorliegenden Datenvielfalt als anspruchsvoll. Die Modellierung bleibt daher eine methodische Herausforderung, die in der weiteren Auswertung vertieft und über das Projektende hinaus bearbeitet werden muss.

## SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Ergebnisse des NEMUR-Projekts zeigen, dass eine angepasste Fütterung und die Nutzung heimischer Futtermittel einen Beitrag zur Verringerung der Emissionen leisten könnten. Ein besonderes Augenmerk sollte zusätzlich auf der möglichen Reduktion der Nahrungskonkurrenz zwischen Mensch und Tier liegen. Durch den gezielten Einsatz von Koprodukten der Lebensmittelverarbeitung kann der Anteil an Futtermitteln minimiert werden, die auch für die menschliche Ernährung geeignet wären.

Darüber hinaus verdeutlichen die Ergebnisse, dass Wiederkäuer eine zentrale Rolle im Ernährungssystem einnehmen, da sie pflanzliche Biomasse verwerten können, die für den Menschen nicht nutzbar ist, und daraus hochwertiges tierisches Eiweiß erzeugen. Der Einsatz von Leguminosen ist in diesem Zusammenhang nicht nur mit der Reduktion der Nahrungskonkurrenz zu begründen, sondern mit ihrem Vermögen, atmosphärischen Stickstoff zu fixieren und damit mineralischen Stickstoffdünger zu ersetzen. Dadurch können Ressourceneffizienz, Bodenfruchtbarkeit und ökologische Nachhaltigkeit verbessert werden.

Insgesamt kann die Umsetzung der im NEMUR-Projekt gewonnenen Erkenntnisse zur Steigerung der Ressourceneffizienz und Resilienz landwirtschaftlicher Systeme beitragen und die gesellschaftliche Akzeptanz der Nutztierhaltung im Kontext nachhaltiger Ernährungssysteme unterstützen.

## AUSGEWÄHLTE VERÖFFENTLICHUNGEN

Mertens P et al. (2025): Einfluss von Sojaöl und variierenden Konzentratanteilen in der Ration von Milchkühen auf Leistungsparameter und Methanemissionen. Tagungsband 25. Forum angewandte Forschung in der Rinder- und Schweinefütterung 28.-29.04.2025 in Fulda, S.108-111

Unruh C et al. (2024): Investigations on the relationship between locomotion score and methane emissions of cows. International Research Symposium on Agricultural Greenhouse Gas Mitigation. From Research to Implementation. 21.-24.10. in Berlin, Germany. Book of Abstracts; p. 128. doi. 10.3220/WP1731925265000

Peschel M et al. (2024): Influence of the potentially human-edible fraction of rations of dairy cows on methane emissions. Proceedings FLI Junior Scientist Symposium, 20.-22.11. in Braunschweig, Germany, p. 56

## Handlungsempfehlungen für Politik und Praxis

### 1. Rolle der Wiederkäuer im Ernährungssystem berücksichtigen:

Strategien im Agrar- und Ernährungskontext sollten die besondere Fähigkeit von Wiederkäuern einbeziehen, pflanzliche Biomasse zu nutzen, die für den Menschen nicht verwertbar ist, und daraus hochwertiges Eiweiß für die menschliche Ernährung zu erzeugen. Damit kann die Bedeutung der Wiederkäuer hinsichtlich des Klimaschutzes und als Teil nachhaltiger Ernährungssysteme gestärkt werden.

### 2. Ökologische Funktionen und Kreislaufprozesse fördern:

Maßnahmen zur Weiterentwicklung nachhaltiger Fütterungssysteme sollten die Nutzung von Koprodukten der Lebensmittelverarbeitung sowie den gezielten Einsatz von Leguminosen unterstützen. Dabei steht die Reduktion der Nahrungskonkurrenz und die Nutzung von Leguminosen im Vordergrund. Auf diese Weise kann die Kreislaufwirtschaft gestärkt und die Resilienz landwirtschaftlicher Produktionssysteme erhöht werden.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Landwirtschaft, Ernährung  
und Heimat

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

### Biosicherheit in der Schweine- und Geflügelhaltung als Beitrag zum Klimaschutz

**Carola Sauter-Louis, Martin Oettler, Natalie Wischnewski (Friedrich-Loeffler-Institut);  
Eva Zeiler (Hochschule Weihenstephan)**

#### ZIELSETZUNG

Ziel des Projekts „Ökologische Tierhaltung als Beitrag zum Klimaschutz – im Fokus von Tierkrankheiten und Tierseuchen“ (ÖTiKlis) war es, den Klimaschutz durch eine bessere Tiergesundheit in deutschen Schweine- und Geflügelbetrieben zu unterstützen. Dies soll vor allem erreicht werden, indem die Lebens- und Produktionsleistung gesteigert und der unproduktive Anteil reduziert wird. Damit ist gemeint, dass durch optimale Haltungsbedingungen und ein gutes betriebliches Management Krankheiten im Tierbestand verringert werden. Eine wichtige Rolle spielen dabei Biosicherheitsmaßnahmen. Darunter werden alle Vorkehrungen verstanden, die den Eintrag und die Ausbreitung von Krankheitserregern in einen Tierbestand verhindern oder möglichst geringhalten. Damit soll die Gesunderhaltung der Tierbestände gesichert und ein Seucheneintrag verhindert werden.

Da Impfungen und Behandlungen von Tierseuchen wie der Afrikanischen Schweinepest und der Geflügelpest in Deutschland derzeit nicht möglich bzw. nicht erlaubt sind, stellen Biosicherheitsmaßnahmen die einzige wirksame Strategie dar, um deren Ausbreitung zu verhindern. So lassen sich Tierverluste durch Bestandstötungen infolge eines Tierseuchenausbruchs vermeiden und der unproduktive Anteil deutlich reduzieren.

Mit Hilfe des ÖTiKlis-Projekts sollen praktische Biosicherheitsmaßnahmen verbessert und dadurch die Tiergesundheit in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung weiter optimiert werden. Zudem sollen die Klimaauswirkungen eines Tierseuchenausbruchs berechnet werden, um die Bedeutung von Biosicherheitsmaßnahmen nicht nur für die Tiergesundheit, sondern auch für den Klimaschutz hervorzuheben.

#### METHODIK

Zu Projektbeginn wurde eine anonyme Online-Umfrage unter deutschen Landwirt\*innen durchgeführt. Mithilfe eines standardisierten Fragebogens wurden das Risikobewusstsein, die Selbsteinschätzung des Biosicherheitsstatus und die allgemeine Einstellung zur Biosicherheit erfasst. Zusätzlich wurden Informationen über potenzielle Eintragswege von Krankheitserregern, genutzte Informationsquellen und mögliche Unterstützungsangebote erhoben. Die Daten wurden deskriptiv und explorativ ausgewertet, einschließlich der Analyse von Zusammenhängen zwischen Aussagen zur Wichtigkeit, Einhaltung und Vorhandensein eines Biosicherheitskonzepts. Außerdem wurde erfasst, welche Eintragswege als besonders risikoreich oder gut geschützt wahrgenommen wurden, um Muster in der Risikowahrnehmung und Handlungsbedarf zu identifizieren.

Nachdem das Risikobewusstsein und die Einstellung der Landwirte gegenüber dem Thema Biosicherheit erfasst

#### HIGHLIGHTS

- Landwirte sind sich der Bedeutung von Biosicherheitsmaßnahmen bewusst.
- Tiergesundheitsdaten eignen sich nur eingeschränkt zur Beurteilung der Effektivität von Biosicherheitsmaßnahmen.
- Epidemiologische Einheiten besitzen einen hohen Stellenwert für die interne Biosicherheit.
- Erstmals wurde der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck (4,0 kg CO<sub>2</sub> Äq / kg Lebendgewicht) eines Ausbruchs der Afrikanischen Schweinepest simuliert.

wurden, stellte sich die Frage, ob das Biosicherheitsniveau einen Einfluss auf wichtige Tiergesundheitsparameter wie Tierverluste oder Schlachthofbefunde hat. Ziel war es, die Effektivität von Biosicherheitsmaßnahmen anhand von Tiergesundheitsdaten quantifizierbar zu machen. Dazu wurde eine standardisierte Onlineumfrage erstellt, um die in der landwirtschaftlichen Praxis umgesetzten Biosicherheitsmaßnahmen sowie die dazugehörigen Tiergesundheitsdaten zu erfassen. Nur vollständig beantwortete Datensätze flossen in die Auswertung ein. Für eine einheitliche Gruppierung der Teilnehmenden wurde auf Grundlage der Fachliteratur und der gesetzlichen Mindeststandards festgelegt, welche Hygienemaßnahmen erfüllt sein müssen. Anschließend wurden die Teilnehmenden entsprechend ihrer Antworten zur Umsetzung dieser Maßnahmen in Gruppen mit hohem oder niedrigem Biosicherheitsniveau eingeteilt. Mittels Hypothesentests wurde überprüft, ob ein Zusammenhang zwischen dem Biosicherheitsniveau und den Tiergesundheitsdaten, Tierverlusten, Schlachthofbefunden und Verwurfraten besteht.

Anhand retrospektiver Daten zu Tierseuchenausbrüchen wurde untersucht, inwieweit sich durch den präventiven Einsatz strenger Biosicherheitsstandards sowie durch die Anwendung des Konzepts epidemiologischer Einheiten vollständige Bestandsräumungen im Seuchenfall vermeiden lassen.

Darüber hinaus wurde mittels einer Lebenszyklusanalyse (LCA) der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck ermittelt, der durch ein Tierseuchengeschehen verursacht wird. Als Referenz diente ein durchschnittlicher deutscher Mastschweinebetrieb, auf dessen Grundlage der typische Verlauf eines Ausbruchs der Afrikanischen Schweinepest einschließlich der seuchenhygienischen Maßnahmen modelliert wurde. Anschließend wurden die Emissionen dieses Szenarios berechnet und mit denen einer regulären Produktion ohne Seuchengeschehen verglichen.

## KLIMAWIRKUNG

Das ÖTiKlis-Projekt zeigte, dass ein Tierseuchenausbruch nicht nur aus Sicht des Tierwohls und ökonomischen Aspekten unbedingt zu vermeiden ist, sondern auch aufgrund der klimatischen Auswirkungen. Ein Ausbruch der Afrikanischen Schweinepest führt im Durchschnitt zu einer Erhöhung der Betriebsemissionen um 150 % im Vergleich zur regulären Mastschweineproduktion. Daher ist es unabdingbar, die Tiere durch eine hohe Biosicherheit präventiv vor einem Tierseucheneintrag zu schützen und gesund zu halten, dadurch ihre Lebens- und Produktionsleistung zu optimieren und so den unproduktiven Anteil zu reduzieren.

## ERGEBNISSE

In die Auswertung der Umfrage zur Erfassung des Risikobewusstseins der Landwirt\*innen flossen insgesamt 239 vollständige Datensätze ein. Diese waren auf 13 von insgesamt 16 Bundesländern, mit Schwerpunkt Baden-Württemberg ( $n = 51$ ; 21,3 %), Nordrhein-Westfalen ( $n = 45$ ; 18,8 %) und Bayern ( $n = 41$ ; 17,2 %) verteilt. Die Teilnehmenden hatten in den meisten Fällen über 20 Jahre Erfahrung ( $n = 116$ ; 48,5 %) in der Tierhaltung. Die gängigsten Produktionssysteme waren die konventionelle Haltung mit Zugang zu Auslauf ( $n = 125$ ; 52,3 %) sowie die konventionelle Stallhaltung ( $n = 92$ ; 38,5 %). Hühner ( $n = 141$ ; 59 %), Rinder ( $n = 106$ ; 44,4 %) und Schweine ( $n = 70$ ; 29,3 %) waren die am häufigsten gehaltenen Tierarten. Mehr als die Hälfte der Betriebe hielt mehr als eine Tierart ( $n = 133$ ; 55,6 %).

Alle fünf Aussagen zur Bedeutung der Biosicherheit auf dem Betrieb wurden von der Mehrheit der Landwirt\*innen mit „trifft zu“ oder „trifft eher zu“ bewertet. Die stärkste Zustimmung erhielt die Aussage „Bedeutung der Biosicherheit“ ( $n = 199$ ; 83,3 %), gefolgt von „Wissen über amtliche Maßnahmen“ ( $n = 176$ ; 73,6 %), „Biosicherheitskonzept“ ( $n = 160$ ; 66,9 %), „Einhaltung des Biosicherheitskonzepts“ ( $n = 147$ ; 61,5 %) und „Gefahr für die Existenz“ ( $n = 126$ ; 52,7 %) (Abb. 1Abbildung).

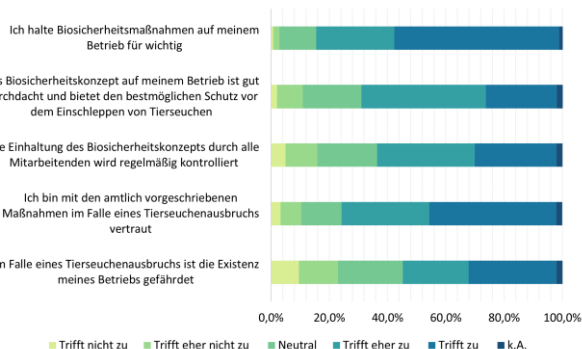


Abbildung 1: Likert-Skala zu Aussagen über die Bedeutung der Biosicherheit auf dem Betrieb, wie von den Teilnehmenden angegeben.

Die Mehrheit der Teilnehmenden ( $n = 203$ ; 84,5 %) gab an, dass ein Biosicherheitskonzept auf ihrem Betrieb vorhanden sei. Die Informationsquellen für die Erstellung des Konzepts waren am häufigsten Tierärzt\*innen ( $n = 151$ ; 63,2 %) und Berufskolleg\*innen ( $n = 78$ ; 32,6 %).

In der Umfrage wurden neben den Einstellungen zur Biosicherheit auch mögliche Risiken und bereits gut geschützte Bereiche aus Sicht der Landwirt\*innen erfasst. Die höchsten Risiken für die Einschleppung einer Tierseuche wurden bei Wildvögeln ( $n = 129$ ; 54 %), Menschen ( $n = 109$ ; 45,6 %) und Schädlingen ( $n = 106$ ; 44,4 %) gesehen (Abb. 2).

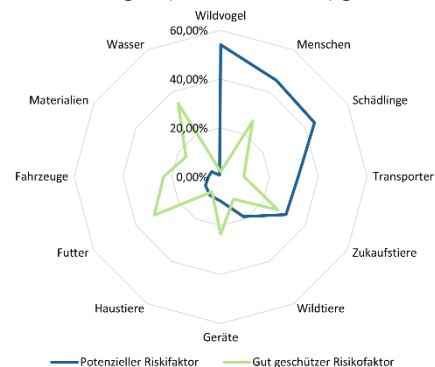


Abbildung 2: Radardiagramm zu den Risikofaktoren (blau) sowie den Eintragswegen, die von den Teilnehmenden als gut geschützt wahrgenommen wurden (grün).

Die als am besten geschützt eingeschätzten Eintragswege waren Wasser ( $n = 83$ ; 34,7 %), Futtermittel ( $n = 75$ ; 31,4 %), Zukaufstiere ( $n = 65$ ; 27,2 %) und Menschen ( $n = 63$ ; 26,4 %). In den meisten Fällen deckten sich die als höchstes Risiko eingeschätzten Eintragswege nicht mit denen, die als am besten geschützt angegeben wurden.

Diese Diskrepanz war Grundlage für die zweite Online-Umfrage, in der geprüft wurde, ob sich das Biosicherheitsniveau in den Tiergesundheitsdaten widerspiegelt und damit die Wirksamkeit eines Biosicherheitskonzepts messbar ist. Insgesamt nahmen 97 Schweinehalter\*innen und 128 Geflügelhalter\*innen an der Befragung teil, wovon jeweils rund die Hälfte vollständige Angaben machte. Die Betriebe waren über ganz Deutschland verteilt, mit Ausnahme einzelner Stadtstaaten und Bundesländer. Die meisten Schweinebetriebe ( $n = 93$ ) stammten aus Bayern ( $n = 25$ ; 26,9 %), Hessen ( $n = 16$ ; 17,2 %) und Niedersachsen ( $n = 14$ ; 15,1 %), während die Mehrheit der Geflügelbetriebe ( $n = 115$ ) in Bayern ( $n = 37$ ; 32,2 %), Nordrhein-Westfalen ( $n = 22$ ; 19,1 %) und Niedersachsen ( $n = 14$ ; 12,3 %) lag.

Von den 93 befragten Schweinebetrieben wirtschafteten 79,6 % ( $n = 74$ ) konventionell und 20,4 % ( $n = 19$ ) ökologisch, während bei den 116 Geflügelbetrieben 75,9 % ( $n = 88$ ) konventionell und 24,1 % ( $n = 28$ ) ökologisch betrieben wurden. Bei den Produktionsrichtungen hielten rund die Hälfte der Schweinehalter\*innen ausschließlich Mast Schweine ( $n = 46$ ; 49,5 %), während in der Geflügelhaltung vor allem Legehennen ( $n = 49$ ; 42,6 %) und Masthühner ( $n = 24$ ; 20,9 %) dominierend waren. Am häufigsten wurden Schweine in Stallhaltung ( $n = 59$ ; 64,1 %) und Geflügel im Freiland ( $n = 50$ ; 44,6 %) gehalten, gefolgt von verschiedenen Misch- und Sonderformen. Tierseuchenausbrüche wurden von 6,1 % der Schweinebetriebe ( $n = 4$ ) und 8,6 % der Geflügelbetriebe ( $n = 7$ ) berichtet, darunter Afrikanische Schweinepest, Geflügelpest und Salmonellose. Auch die Aujeszkysche Krankheit wurde genannt (Deutschland gilt seit 2003 als frei von der Aujeszkyschen Krankheit bei Hausschweinen).

Die Einstufung der Betriebe in hohes oder niedriges Biosicherheitsniveau erfolgte anhand der Erfüllung von mindestens 75 % der festgelegten Hygienemaßnahmen, wobei nur vollständige Datensätze berücksichtigt wurden. Bei den Schweinebetrieben der niedrigen Biosicherheitsgruppe ( $n = 30$ ) lagen die größten Defizite in der Desinfektion der Räder von Lieferfahrzeugen ( $n = 30$ ; 100 %), der Reinigung von Tränken ( $n = 26$ ; 86,7 %) sowie der erneuten Nutzung der Hygieneschleuse nach Verlassen des reinen Bereichs ( $n = 25$ ; 83,3 %) (Abb. 3 A).

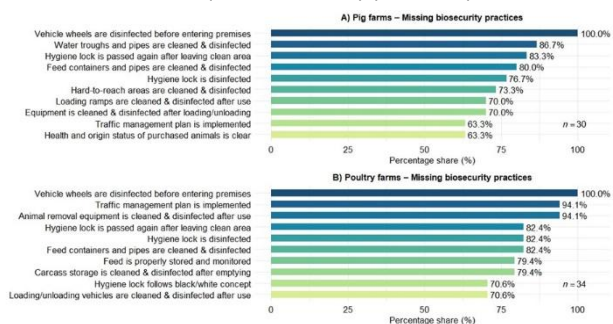


Abbildung 3: Häufigste Ausschlusskriterien für die Einstufung in ein hohes Biosicherheitsniveau in Prozent (n beinhaltet nur die Anzahl der Betriebe der niedrigen Biosicherheitsgruppe).

Bei den Geflügelbetrieben der niedrigen Biosicherheitsgruppe ( $n = 34$ ) waren vor allem die Desinfektion der Lieferfahrzeugräder ( $n = 34$ ; 100 %), fehlende Wegeführungssysteme für Besucher\*innen und Lieferverkehr ( $n = 32$ ; 94,1 %) sowie die Reinigung der genutzten Geräte nach Entfernung der Kadaver ( $n = 32$ ; 94,1 %) problematisch (Abb. 3 B).

Im Anschluss wurden die Tierverluste in Schweine- und Geflügelbetrieben in Abhängigkeit vom Biosicherheitsniveau analysiert. In der Mastschweinproduktion wurden keine signifikanten Unterschiede ( $p = 0.258$ ) bei den Tierverlusten zwischen hohem und niedrigem Biosicherheitsniveau festgestellt. Bei hohem Biosicherheitsniveau betrugen die durchschnittlichen Verluste 2,0 %, bei niedrigem 1,9 %. Bei Zuchtsauen lagen die Verluste bei 3,8 % unter hohem und 2,2 % unter niedrigem Biosicherheitsniveau, wobei kein statistisch signifikanter Unterschied ( $p = 0.101$ ) festgestellt wurde, aber ein möglicher Trend erkennbar war. In der Aufzucht der Ferkel betrugen die Verluste 1,8 % bei hohem und 2,6 % bei niedrigem Biosicherheitsniveau ( $p = 0.103$ ). Bei Saugferkeln waren die Verluste generell höher: 9,3 % bei hohem und 10,9 % bei niedrigem Niveau ( $p = 0.385$ ).

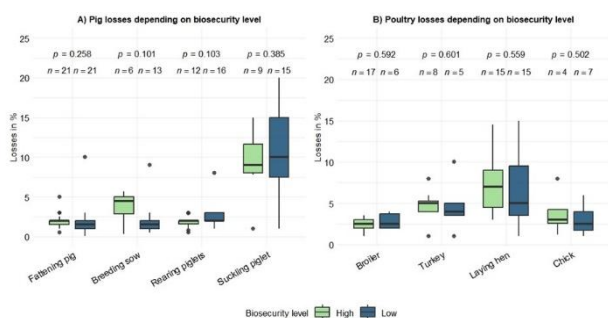


Abbildung 4: Tierverluste in Abhängigkeit vom Biosicherheitsniveau (Saugferkel < 30 kg Lebendgewicht, Aufzuchtferkel > 30 kg bis Beginn der Mast).

Ein ähnliches Bild zeigte sich in der Geflügelproduktion. Bei Masthähnchen betrugen die Verluste 2,4 % bei hohem und 2,8 % bei niedrigem Biosicherheitsniveau ( $p = 0.592$ ). In der Putenmast lagen die Verluste bei 4,8 % bei hohem und 4,7 % bei niedrigem Niveau ( $p = 0.601$ ). Bei Legehennen betrugen die Verluste 7,1 % bei hohem und 6,7 % bei niedrigem Niveau ( $p = 0.559$ ). In der Aufzucht der Küken lagen die Verluste bei 3,8 % bei hohem und 3,0 % bei niedrigem Niveau ( $p = 0.502$ ) (Abb. 4). Es gab keine signifikanten Unterschiede bei den Leber- und Lungenbefunden bei Mastschweinen oder in der Verwurfsrate bei Broilern zwischen der hohen und der niedrigen Biosicherheitsgruppe. Die Mittelwerte für Leberbefunde lag bei 5,1 % in der hohen und bei 4,2 % in der niedrigen Biosicherheitsgruppe. Die Lungenbefunde beliefen sich bei einem hohen Niveau auf 5,4 % und bei niedrigen Standards auf 4,8 %. Die Verwurfsraten beliefen sich auf 1,1 % in der hohen und auf 2 % in der niedrigen Biosicherheitsgruppe. Insgesamt deuten die Ergebnisse darauf hin, dass die Unterschiede zwischen hoher und niedriger Biosicherheitsgruppe in dieser Studie gering ausfallen, da überwiegend Betriebe mit insgesamt guten Leistungen untersucht wurden.

Zudem wurde mithilfe retrospektiver Daten zu Seuchenbekämpfungsmaßnahmen analysiert, inwieweit sich durch die Anwendung des Konzepts epidemiologischer Einheiten eine vollständige Bestandsräumung vermeiden ließ. Eine epidemiologische Einheit bezeichnet eine Gruppe von Tieren, die für einen Krankheitserreger empfänglich sind und ein vergleichbares Infektionsrisiko aufweisen. Welche Tiere zu einer solchen Einheit gehören, wird auf Grundlage epidemiologischer Gesichtspunkte festgelegt. Eine epidemiologische Einheit kann dabei einen Teil des Bestands oder auch mehrere Bereiche eines Betriebs umfassen. Die Analyse ergab, dass eine Teilbestandstötung – sofern die betrieblichen Voraussetzungen dafür gegeben sind – in jedem Fall in Betracht gezogen werden sollte. In den untersuchten Fällen konnte trotz eines Seucheneintrags in einem Betriebsteil die Tierproduktion fortgeführt werden, und die nicht betroffenen Tiere konnten ihrem ursprünglichen oder einem alternativen Verwendungszweck zugeführt werden. Durch die Begrenzung des Tierausfalls ergaben sich positive Effekte auf Tierwohl, Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit. Es ist jedoch anzumerken, dass aus den betrachteten Fällen keine uneingeschränkte Verallgemeinerung abgeleitet werden kann und erst eine fallspezifische Risikoanalyse die Grundlage für die Implementierung eines solchen Verfahrens bilden sollte.

Abschließend wurde eine Ökobilanz durchgeführt, um die Treibhausgasemissionen (THG) zu quantifizieren, die durch die im Seuchenfall ergriffenen Gegenmaßnahmen in einem Schweinemastbetrieb entstehen. Als Beispiel diente dabei ein Ausbruch der ASP. Da im Rahmen einer LCA alle Emissionen produktbezogen berechnet werden und im Falle einer Tierseuche keine Produktion stattfindet, musste zunächst ein Referenzprodukt definiert werden. Zu diesem Zweck wurde ein Vergleich zwischen einer regulären Produktion ohne Seuchenfall und einer Produktion mit ASP-Ausbruch sowie anschließender Wiederaufnahme des normalen Betriebsablaufs erstellt.



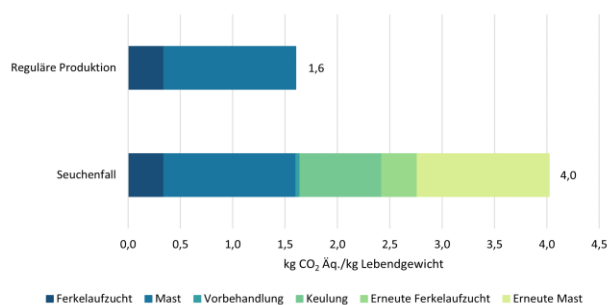


Abbildung 5: LCA-Ergebnisse im Worst-Case Schweinemast ohne Seuchengeschehen im Vergleich zur Schweinemast mit Seuchengeschehen.

Für den angenommenen Standardbetrieb ergab die LCA-Modellierung einen Wert von 1,6 kg CO<sub>2</sub>-Äq./kg Lebendgewicht (Abb. 5). Dieser entspricht laut gängiger Literatur einem durchschnittlichen Emissionsniveau. Die Hauptquelle der Emissionen stellt dabei die Futtermittelproduktion dar. Für den Seuchengefall wurden verschiedene Zeitpunkte des Seucheneintritts berücksichtigt. Tritt die Seuche in einer frühen Produktionsphase auf, fallen vergleichsweise geringe THG-Emissionen an. Je weiter die Produktionsphase jedoch fortgeschritten ist, desto höher sind die anzurechnenden Emissionen. Im vorliegenden Modell wurde ein Worst-Case-Szenario abgebildet, bei dem das Seuchengeschehen kurz vor dem Ende einer Produktionsphase auftritt. Der größte Anteil mit 78 % entfiel dabei auf die Tierkörperbeseitigung. Weitere Emissionen entstanden durch Transport- und Fahrtenaufkommen sowie durch Reinigungs- und Desinfektionsmaßnahmen. Bei der Berechnung des vollständigen Produktionsprozesses – also der ersten Produktionsphase, das Seuchengeschehen und der anschließenden Wiederaufnahme der Produktion – wurden die THG-Emissionen in Relation zum Referenzprodukt (1 kg Lebendgewicht) gesetzt. Die Abbildung 5 zeigt die Auswirkungen des Seuchengeschehens auf die Emissionsbilanz: Durch die Seuchenbekämpfungsmaßnahmen und den Produktionsausfall steigen die THG-Emissionen pro Kilogramm Lebendgewicht auf das 2,5-fache, also von 1,6 kg CO<sub>2</sub>-Äq./kg Lebendgewicht auf 4,0 kg CO<sub>2</sub>-Äq./kg Lebendgewicht.

### SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Ergebnisse aus der Umfrage zur Einstellung der Landwirte gegenüber dem Thema Biosicherheit zeigen, dass viele Landwirte sich aktiv mit dem Thema Biosicherheit auseinandersetzen und bereit sind, Maßnahmen umzusetzen. Gleichzeitig zeigen sich allerdings Unsicherheiten über die tatsächliche Wirksamkeit einzelner Maßnahmen.

Ziel der zweiten Online-Umfrage war es, Zusammenhänge zwischen dem Biosicherheitsniveau und Tiergesundheitsdaten zu prüfen. Die Ergebnisse zeigten keine signifikanten Effekte auf Verluste oder Schlachthofbefunde, vermutlich weil die teilnehmenden Betriebe bereits überdurchschnittliche Tiergesundheitsparameter aufwiesen. Trotz fehlender statistischer Unterschiede bleiben Hygienemaßnahmen die wichtigste Strategie zur Vermeidung von Tierseuchen. Zukünftige Studien sollten größere Stichproben und weitere Einflussfaktoren berücksichtigen.

Die Ergebnisse zum Einsatz epidemiologischer Einheiten verdeutlichen deren Nutzen im Falle eines Seuchenausbruchs. Die vermiedenen Tierverluste machen diesen Nutzen unter anderem in Bezug auf Nachhaltigkeitsstandards deutlich.

Ein Seuchengefall führt zu einer deutlichen Erhöhung der Treibhausgasemissionen in der Schweinefleischproduktion. Daraus ergeben sich verschiedene Reduktionspotenziale: Grundsätzlich sind konsequente Hygienemaßnahmen zu empfehlen, um THG-Emissionen bereits präventiv gering zu halten. Kommt es dennoch zu einem Seuchenausbruch, können die Bekämpfungsmaßnahmen klimaschonender gestaltet werden. Das Umweltbundesamt empfiehlt hierfür den Einsatz von Tierkörperbeseitigungsanlagen mit CO<sub>2</sub>-Filtern. Da deren Verwendung jedoch nicht verpflichtend ist, finden sie in der Praxis bislang kaum Anwendung. Die vorliegenden Ergebnisse konzentrieren sich auf das Treibhausgaspotenzial. Aufgrund des Einsatzes von Desinfektionsmitteln und Wasser wäre es jedoch sinnvoll, in zukünftigen Untersuchungen auch weitere Wirkungskategorien, wie Versauerung, Wasserverbrauch und Flächeninanspruchnahme in die Ökobilanz mit einzubeziehen.

### AUSGEWÄHLTE VERÖFFENTLICHUNGEN

- Herrmann A, Schulz K, Wischnewski N, Brüssau J, Zeiler E, Sauter-Louis C (2024): Risk Awareness and Attitude of German Farmers towards Biosecurity Measures. *Animals* (Basel). doi. 10.3390/ani14071102
- Oettler MJ, Stumpf G, Schulz K, Todte M, Hüttner K, Heyne H, Mettenleiter TC, Conraths FJ, Sauter-Louis C (2025): Strict Biosecurity and Epidemiological Segmentation Enable Partial Culling During a Highly Pathogenic Avian Influenza Outbreak. *Vet Med* (Auckl). doi. 10.2147/VMRR.S539444

### HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN FÜR POLITIK UND PRAXIS

- Risikobewusstsein und Biosicherheitsmaßnahmen durch Schulungen und Beratung verbessern, insbesondere zu Reinigung und Desinfektion.
- Epidemiologische Einheiten bereits in Bau- und Veterinärberatung berücksichtigen, um Betriebe bei der Umsetzung zu unterstützen.
- Teilbestandstötungen im Seuchengefall in Betracht ziehen, sofern die epidemiologische Unterteilung diese Möglichkeit aufzeigt.
- Weitere Wirkungskategorien wie Versauerung, Wasserverbrauch und Flächenbedarf zur Bewertung der Umweltfolgen von Tierseuchen untersuchen.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Landwirtschaft, Ernährung  
und Heimat

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



### Ertragsentwicklung und optimierte N-Düngung im Klimawandel

**Mareike Söder, Michael Danne, Masud Heydarli, Philipp Löw, Frank Offermann, Faranak Omid, Bernhard Osterburg (Thünen-Institut); Til Feike, Christian Jorzig, Dima Sabboura (Julius Kühn-Institut)**

#### ZIELSETZUNG

Die Reduzierung hoher Stickstoff(N)-Bilanzüberschüsse ist eine wesentliche Säule zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen aus der Landwirtschaft. Neben der unerwünschten Nitratauswaschung in das Grundwasser entstehen aus nicht genutztem N-Dünger Lachgas, Stickoxide und Ammoniak.

Für eine hohe Düngeneffizienz ist eine auf den Bedarf und das Ertragspotenzial der Kulturpflanzen angepasste Düngung essentiell, die wiederum wesentlich durch die im Jahr vorherrschenden Wachstumsbedingungen beeinflusst werden. Folgt man den derzeit vorliegenden Klimaprojektionen, ist in den nächsten Jahrzehnten mit fortschreitendem Klimawandel mit einer Zunahme an extremen Temperaturen, insbesondere an Sommertagen, heißen Tagen und Tropennächten und auch mit Starkniederschlägen und Trockenperioden in Deutschland zu rechnen. Aufgrund der steigenden Variabilität der Wachstumsbedingungen sind Folgen für die N-Effizienz sehr wahrscheinlich.

KlimaN untersucht den Einfluss des Klimawandels auf die Erträge und die Potenziale der N-Effizienzsteigerung mit dem Ziel, die Klimaberichterstattung zu verbessern. Die Analysen tragen außerdem dazu bei, betriebliche Maßnahmen und Strategien zu entwickeln, um die für die Erreichung der Klimaschutzziele notwendigen Steigerungspotenziale der N-Ausnutzung auch unter dem Einfluss klimawandelbedingter Ertragsschwankungen zu erreichen. Zentrale Frage war, wie eine an den Klimawandel angepasste N-Düngung auf den Betrieben realisiert werden kann und welchen Beitrag die Züchtung verbesserter Sorten mit höherem Ertragspotenzial, verbesserter Stressresistenz und erhöhter Ressourcennutzungseffizienz leisten können.

#### METHODIK

Ausgangspunkt stellte eine statistische Analyse der historischen Entwicklung der Düngemengen und N-Nutzungseffizienzen (NUE) auf Basis nationaler Statistiken und des Testbetriebsnetzes Landwirtschaft dar. Mithilfe von Maschine-Learning (ML) Ansätzen wurden dann extreme Witterungsbedingungen identifiziert, die signifikante Rückgänge der NUE verursachen sowie regionale Hotspots mit einem hohen Risiko für witterungsbedingte NUE-Rückgänge lokalisiert.

Weiterhin wurden anhand eines hypothetischen Entscheidungsexperiments (Discrete Choice) untersucht, welche Faktoren das Verhalten deutscher Landwirt\*innen bei der Spätdüngung im Winterweizen beeinflussen.

Mithilfe von deutschlandweiten Langzeitdaten (1995-2021) des Bundessortenamts wurden außerdem für die Analyse der Entwicklung der NUE von Weizen, Gerste, Roggen, Raps, Mais und Erbse zehntausende Genotyp × Umwelt × Management-Kombinationen mittels gemischter linearer Modelle analysiert. In einer anschließenden Analyse wurden

#### HIGHLIGHTS

- Unterstützung der Backweizeninitiative des BMLEH mit mehreren Gastbeiträgen auf Basis der Projektergebnisse.
- Best Poster Award bei der 50. Konferenz der Vereinigung der Europäischen Agrarökonominnen und -ökonominnen (EAAE) für das KlimaN-Poster von Omid et al. 2025.

für Winterweizen Daten von 73 Standorten im Zeitraum von 1993 bis 2021 im Hinblick auf die Auswirkungen ungünstiger Witterung auf Erträge, THG-Emissionen pro Hektar und pro kg Korn sowie pro kg Protein untersucht.

Für eine ergänzende Szenarioanalyse wurde ein Multi-Modell-Ensemble (MME) aus drei prozessbasierten Weizensimulationsmodellen (CERES, CROPSIM und Nwheat) angewendet. Simuliert wurde die phänologische Entwicklung, Biomasse- und Ertragsbildung sowie verschiedene Umweltindikatoren in der Winterweizenproduktion unter verschiedenen N-Düngeniveaus und Klimaszenarien (RCP4.5 und RCP8.5) an repräsentativen Standorten in bedeutenden Weizenanbaugebieten Deutschlands.

#### ERGEBNISSE

##### Entwicklung der N-Düngung

Die Einflussfaktoren auf die Düngung waren in den letzten Jahren vielfältig: volatile Preise, Anpassungen des Düngerechts in 2017 und 2020 sowie längere Dürrephasen, insbesondere in 2018 und 2019.

Die Analysen zeigen einen starken Rückgang des N-Mineraldüngereinsatzes, wobei wir auf nationaler Ebene keinen statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen den relativen Preisen von pflanzlicher Produktion und N-Dünger sowie dem N-Düngerabsatz nachweisen konnten. Eine Analyse der sektoralen NUE zeigte einen Anstieg über die Zeit.

Die größte Reduktion der ausgebrachten N-Mineraldüngermengen, und das konstant über unterschiedliche Betriebstypen hinweg, hat es mit der Verschärfung der maximal zulässigen N-Überschüsse (Kontrollwerte) im Zuge der Novellierung der Düngeverordnung 2017 gegeben (Abb. 1). In den Folgejahren waren die Düngemengen auf den untersuchten konventionellen Betrieben deutlich stabiler auf niedrigem Niveau. Dabei haben jene Betriebe ihre Düngemengen überdurchschnittlich reduziert, die zuvor über dem maximal zulässigen N-Überschuss lagen, also Betriebe mit zuvor sehr ineffizienter Düngung. Die erneute Reform in 2020 mit strengeren Regeln für die Düngebedarfsermittlung zeigt in den statistischen Analysen keinen signifikanten Effekt auf das Düngeniveau.

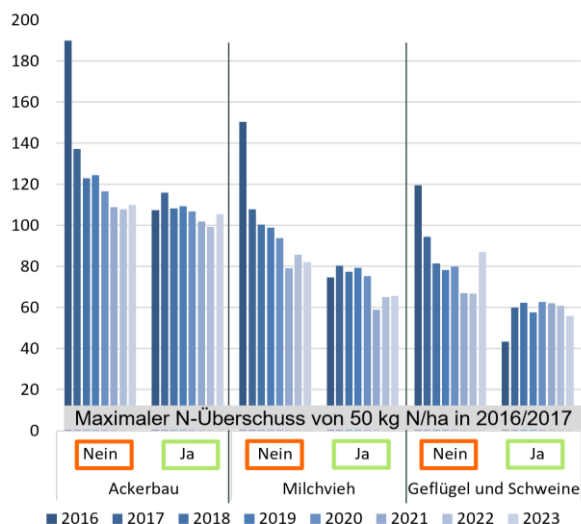


Abbildung 1: Veränderung der N-Düngemengen in unterschiedlichen Betrieben. Durchschnittliche N-Menge in kg/ha für unterschiedliche konventionelle Betriebstypen differenziert nach Einhaltung des maximalen N-Überschusses von 50 kg N/ha in 2016/2017

### Folgen von Extremwetterlagen auf die betriebliche NUE

Die Identifizierung der relevanten extremen Witterungsereignisse für NUE-Verluste ist mit der Herausforderung verbunden, dass unterschiedliche Kulturen zu unterschiedlichen Zeiträumen sensitiv auf extreme Witterungen reagieren, die NUE jedoch nur auf Betriebsebene und nicht kulturspezifisch auf Basis der Daten des Testbetriebsnetzes berechnet werden konnte. Mit umfangreichen Korrelations- und Clusteranalysen wurden daher zunächst die relevantesten Extremwetterlagen in Bezug auf Trockenheit, Staunässe und Hitze zu unterschiedlichen Zeiträumen im Jahr für die weitere Analyse ausgewählt.

Der ML-Ansatz identifizierte für alle vier untersuchten Regionen Trockenheit im späten Frühjahr als das bedeutendste Witterungsereignis für relevante Einbrüche in der NUE. Das folgende „Ranking“ der bedeutendsten Witterungsereignisse für einen relevanten Einbruch der NUE unterscheidet sich je nach Region. Mit Ausnahme des Ostens Deutschlands gehört auch Staunässe zum Beginn der Wachstumsperiode zu den drei relevantesten Witterungsereignissen in allen Regionen. Im Osten Deutschlands gehören dagegen noch Hitze im späten Frühjahr und Sommertrockenheit dazu.

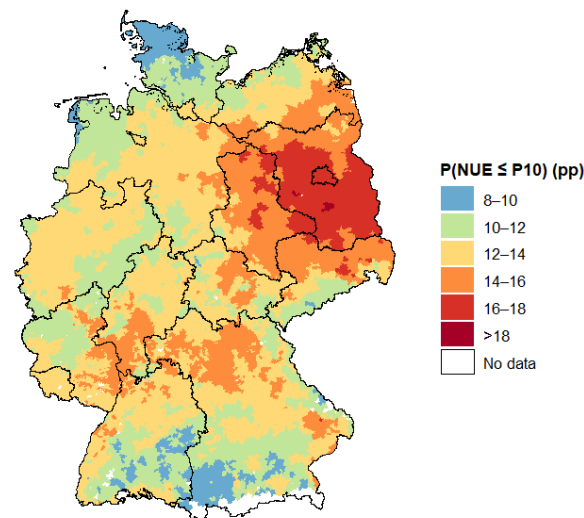


Abbildung 2: Beispiel aus den vorläufigen Ergebnissen: Risiko (%) eines signifikanten Rückgangs der NUE aufgrund der Witterung in 2019 (ohne betriebsindividuelle Effekte)

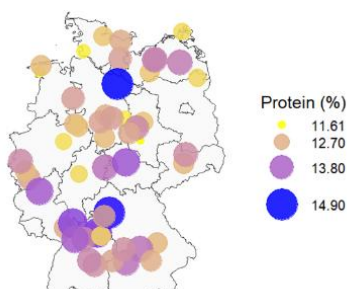
In einem weiteren Schritt ließen sich die Standorte identifizieren, die auf Basis der Witterung in der Vergangenheit eine besonders hohe Wahrscheinlichkeit haben, im Ackerbau signifikante Einbrüche in der NUE aufzuweisen. Im hier gezeigten Beispiel der vorläufigen Ergebnisse (Abb. 2) sind das auf Basis der Witterungsdaten in 2019 z. B. Regionen in Brandenburg, Sachsen-Anhalt und im Norden Bayerns, Schleswig-Holstein weist dagegen ein eher geringes Risiko auf.

### Züchtungsfortschritt NUE und Extremwettereffekte

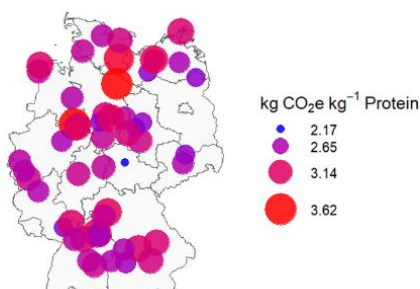
Die Langzeitanalysen zur Entwicklung der NUE mit den Daten des Bundessortenamtes zeigten, dass sich die NUE in den letzten Jahrzehnten durch die Entwicklung und Nutzung verbesserter Sorten signifikant verbessert hat. Trotz einer Reduktion der Stickstoffdüngung in Weizen, Gerste, Roggen, Mais, Raps und Erbse haben die Korn- und Proteinerträge über die letzten drei Jahrzehnte zugenommen bzw. sind nicht gesunken. Für alle Kulturen hat sich die NUE für den Kornertrag dabei signifikant zwischen 12,8 % und 35,2 % und die NUE für den Proteinertrag um 8 % bis 20,7 % verbessert.

Ähnlich wie bei den Analysen für die betriebliche NUE mit den Testbetriebsnetzdaten, zeigten die Analysen zum Einfluss von Hitze- und Trockenstress auf Winterweizen mit den Daten des Bundessortenamtes, dass die stärksten negativen Auswirkungen während der Blüte und zu Beginn

### Proteingehalt (ROHPK, %)



### CO<sub>2</sub> Fußabdruck je kg Protein



### Stickstoffnutzungseffizienz

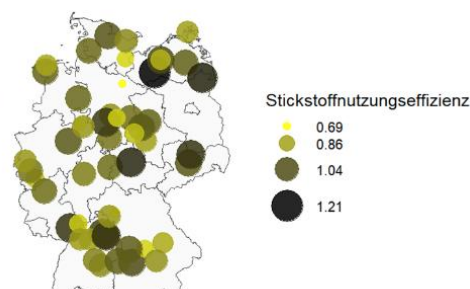


Abbildung 3: Standortspezifische Unterschiede im Proteingehalt, CO<sub>2</sub>-Fußabdruck je kg Protein und Stickstoffnutzungseffizienz (NUE) des Proteintrags bei Winterweizen in Deutschland (VCU-Daten 1993–2021).

## KLIMAWIRKUNG

Die in KlimaN gewonnenen Erkenntnisse zur Entwicklung der NUE und THG-Emissionen tragen mittel- bis langfristig zum Klimaschutz bei. Die N-Effizienzverluste haben sich in den letzten Jahren deutlich verringert, zunehmende Extremwetterlagen erhöhen andererseits das Risiko von Effizienzverlusten und einem verschlechterten CO<sub>2</sub>-Fußabdruck im Ackerbau. Der Züchtungsfortschritt hilft dabei, mit weniger N gleichbleibende Erträge bei verbessertem CO<sub>2</sub>-Fußabdruck zu realisieren. Bessere Ertragsvorhersagen, an das Extremwetterrisiko angepasste Düngung und geänderte Preisanreize können ebenfalls zu einer an den Klimawandel angepassten Düngung beitragen.

der Kornfüllung auftraten. In dieser Phase entscheidet sich, wie viele Körner angelegt werden und wie gut sie sich entwickeln. Jeder zusätzliche Stresstag führte zu 180–200 kg/ha weniger Ertrag. Gleichzeitig sank auch die NUE deutlich. Früher Stress während der Bestockung trat hingegen seltener auf und zeigte kaum messbare Effekte. Später Stress in der Reifephase führte vor allem zu kleineren Körnern, wodurch sich der Proteingehalt pro Korn zwar leicht erhöht, sich die Klimabilanz pro kg Protein durch den reduzierten Gesamt-Proteinertrag pro Hektar aber insgesamt verschlechterte.

Die Bedeutung von substantiellen Unterschieden zwischen Standorten im Hinblick auf die einzelnen Merkmale verdeutlichen sich auch in dieser Analyse mit einer Bandbreite von 11,6–14,9 % im Proteingehalt des Weizenkorns, 2,2–3,6 kg CO<sub>2</sub>-Äq je kg Protein im CO<sub>2</sub>-Fußabdruck des Proteinertrags, und 0,7–1,2 kg N in Korn je kg N verfügbar (gedüngt + Gehalt an verfügbarem mineralisierten N im Boden, N<sub>min</sub>), d.h., in der NUE des Proteinertrags.

## Düngeentscheidungen in der Praxis

In Bezug auf die Düngeentscheidung auf den Betrieben, zeigen die Ergebnisse des Discrete Choice Experiments eine deutliche Heterogenität in den Entscheidungen der Landwirtinnen und Landwirte zur Spätdüngung im Weizen. Positive Konstanten für die Alternativen „reduzierte Spätdüngung“ und „keine Spätdüngung“ deuten darauf hin, dass diese gegenüber der Basisstrategie „Düngung nach Planung zu Vegetationsbeginn“ prinzipiell präferiert wurden. Das Entwicklungsstadium der Pflanzen (Fahnenblatt sichtbar, BBCH 37/39) hatte keinen signifikanten Einfluss auf die Düngeentscheidung.

Entscheidender waren externe Ertragsprognosen: Ein höherer prognostizierter Ertrag im Vergleich zum Fünfjahresdurchschnitt verringert die Wahrscheinlichkeit, auf Spätdüngung zu verzichten oder diese zu reduzieren. Steigt das Risiko, dass die in der Ertragsprognose vorhergesagten Erträge tatsächlich erreicht werden, sinkt die Wahrscheinlichkeit für eine Reduktion der Düngung. Dies gilt auch für den Proteingehalt: je höher die Unsicherheit, dass ein Proteingehalt von 12 % mit einer reduzierten Düngung erreicht wird, desto geringer ist die Bereitschaft der Landwirt\*innen, die Düngemenge zu reduzieren. Auch die Wahrscheinlichkeit, in Gänze auf die Spätdüngung zu

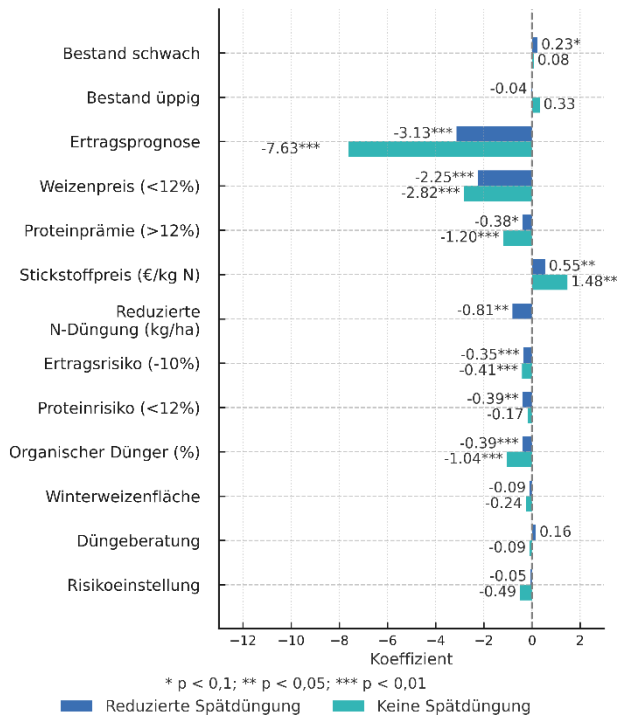


Abbildung 4: Ergebnisse des Discrete Choice Experiments (N=149)

verzichten, sinkt bei steigendem Ertragsrisiko, während Proteinrisiken hier keinen signifikanten Effekt zeigen. Zudem zeigte sich, dass Landwirte eher bereit sind, kleinere Reduzierungen der Stickstoffmengen in der Spätdüngung umzusetzen als größere. Hohe Futterweizenpreise senken signifikant die Wahrscheinlichkeit reduzierter oder ausbleibender Spätdüngung, während steigende Stickstoffpreise den gegenteiligen Effekt haben und zu geringerer Spätdüngung führen. Proteinprämien (> 12 % Protein) verringern die Wahrscheinlichkeit, die Spätdüngung zu reduzieren oder vollständig darauf zu verzichten.

## Projizierte Entwicklung der NUE im Klimawandel

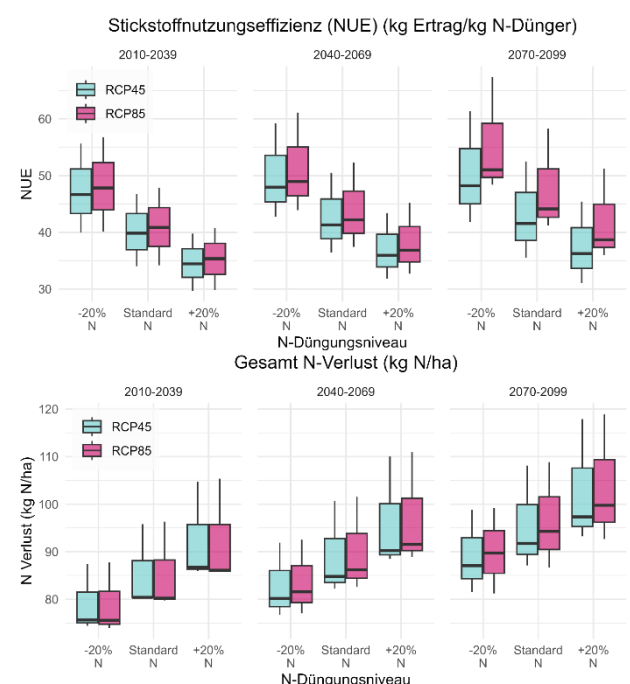


Abbildung 5: Projizierte Entwicklung der NUE des Kornertrags (oben) und der Gesamt N-Verluste (unten) bei sinkenden und steigendem N-Input zu Anfang, Mitte und Ende des Jahrhunderts.

Die Projektionen des prozessbasierten MME zur Analyse der potenziellen Entwicklung von Winterweizen und einhergehender Stickstoffeffizienzen im Klimawandel zeigen für die untersuchten, repräsentativen Anbauregionen in Deutschland tendenziell eine positive Ertragsentwicklung sowohl im Hinblick auf den Kornertrag (Abb. 5 oben) als auch auf den Proteinertrag (nicht gezeigt). Die simulierten Erträge steigen dabei im zeitlichen Verlauf sowie mit zunehmendem N-Düngungsniveau. Unter RCP 8.5 liegen die Erträge höher als unter RCP 4.5, was maßgeblich auf den CO<sub>2</sub>-Düngeeffekt zurückgeführt werden kann.

Die NUE sinkt wie zu erwarten mit steigender N-Düngermenge. Im zeitlichen Verlauf zeigt die NUE einen leicht positiven Trend, der zum einen auf den CO<sub>2</sub>-Düngeeffekt, höhere Erträge und die bessere Aufnahme von Stickstoff zurückzuführen ist, zum anderen auf eine Erhöhung der N-Umsetzung im Boden infolge der globalen Erwärmung. Dies führt jedoch auch zu einer Erhöhung der Gesamt-Stickstoffverluste von ~80 kg zu Beginn des Jahrhunderts auf über 90 kg pro Hektar zum Ende des Jahrhunderts (Abb. 5 unten).

### SCHLUSSFOLGERUNGEN

Eine optimale Düngung, die dem tatsächlichen Nährstoffbedarf der Pflanzen bestmöglich entspricht, ist sowohl im Sinne des Klimaschutzes als auch aus agronomischer, ökologischer und ökonomischer Sicht erstrebenswert. Die Herausforderung für die Betriebe, eine effiziente Düngung zu realisieren, hat angesichts schwankender Preisanreize und volatiler Wachstumsbedingungen in den letzten Jahren eher zugenommen.

Die Analysen zeigen allerdings, dass es Ansatzpunkte für eine Erhaltung einer effizienten N-Düngung und weitere Effizienzsteigerung auch unter den Folgen zunehmender extremer Witterungen im Klimawandel gibt. So hat die Regulierung der Düngung über die N-Überschüsse effektiv die ineffizient düngenden Betriebe adressiert. Bisher konnte dieses Effizienzniveau trotz veränderter regulatorischer Rahmenbedingungen über die Düngeplanung aufrechterhalten werden.

Um dies auch in Zeiten von zunehmenden Extremwetterlagen abzusichern, sollten insbesondere die Regionen mit einem erhöhten witterungsbedingten Risiko für N-Effizienzverluste Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel implementieren. Das betrifft zum einen Anpassungsmaßnahmen zur Stabilisierung des Ertragsniveaus, als auch eine spezifische Berücksichtigung in der Düngeplanung. Eine

bessere Witterungs- und Ertragsvorhersage innerhalb der Wachstumsperiode, insbesondere bei Trockenheit im späten Frühjahr und Staunässe zum Beginn der Wachstumsperiode können dabei wichtige Informationsgrundlagen sein, um auch kurzfristig zumindest für späte Düngegaben die Düngemengen an die Entwicklung der Pflanzen und die Wetter- und Ertragserwartungen anzupassen.

Die Züchtung und Nutzung neuer, verbesserter Sorten leistet außerdem einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung der Stickstoffnutzungseffizienz. Auf Basis der Ergebnisse wird daher empfohlen, die NUE als zusätzliches Kriterium bei der Selektion und in der Wertprüfung neuer Sorten noch stärker zu nutzen. Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass die frühe reproduktive Phase (Blüte bis frühe Kornfüllung) der kritischste Zeitraum für den Winterweizen ist. Tritt in dieser Phase starker Hitze- oder Trockenstress auf, sinken Effizienz und Ertrag am stärksten, und die Klimabilanz verschlechtert sich. Später Stress führt zu erhöhtem Proteingehalt im Korn, nicht jedoch zu höherem Proteinertrag. Eine standortoptimierte Sortenwahl und diversifizierte Anbauziele können helfen, das Risiko zu streuen und den Bedarf an unterschiedlichen Weizenqualitäten auch im Klimawandel THG-effizient zu bedienen.

Die modelbasierten Szenarioanalysen zeigen, dass für Winterweizen unter zukünftigen Klimabedingungen in Deutschland tendenziell höhere Korn- und Proteinerträge bei erhöhter NUE erwartet werden. Die fortwährende Erwärmung führt dabei zu einer steigenden Umsetzung von Stickstoff im Boden, was auf der einen Seite die Verfügbarkeit für die Pflanzen verbessern kann. Auf der anderen Seite führt dies auch zu einer möglichen Erhöhung der N-Verluste um rund 10 kg N pro Hektar und Jahr, die ein erhöhtes Umweltrisiko nach sich ziehen. Daraus resultiert ein klarer Handlungsbedarf für Politik und Praxis, um Effizienzsteigerungen abzusichern, Umweltbelastungen zu begrenzen und den Klimaschutz zu fördern.

### AUSGEWÄHLTE VERÖFFENTLICHUNGEN

Laidig F, Feike T, Brandes H, Piepho H-P (2025) Breeding progress of grain and forage maize in long-term variety trials compared to on-farm yield development. *Theor Appl Genet* 138 (12), 303. <https://dx.doi.org/10.1007/s00122-025-05085-6>

Löw P, Osterburg B (2024) Evaluation of nitrogen balances and nitrogen use efficiencies on farm level of the German agricultural sector. *Agric Syst* 213:103796. <https://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103796>

Laidig F, Feike T, Lichthardt C, Schierholt A, Piepho H. P. (2024) Breeding progress of nitrogen use efficiency of cereal crops, winter oilseed rape and peas in long-term variety trials. *Theor Appl Genet* 137, 45. doi. 10.1007/s00122-023-04521-9

### HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN FÜR POLITIK UND PRAXIS

Politiken, die auf den N-Überschuss abzielen, konnten in der Vergangenheit erfolgreich das Effizienzniveau in der Düngung erhöhen.

Hochrisikogebiete für N-Effizienzverluste durch extreme Witterungen sollten besonders im Fokus stehen für eine an den Klimawandel angepasste Düngeplanung. Bessere Ertragsvorhersagen während der Wachstumsperiode sind Ansatzpunkte, um N-Effizienzverluste durch angepasste späte Düngegaben zu reduzieren.

Förderung, Züchtung und Anbau ertragreicher, stresstoleranter und stickstoffeffizienter Sorten können bei standortangepasstem und diversifiziertem Anbau dazu beitragen, Produktionsziele und Versorgung auch unter ungünstigen Witterungsbedingungen zu sichern.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



## Identifikation zukünftiger züchterischer Potentiale für mehr Klimaschutz in der Pflanzenproduktion – Bewertung des Beitrags des Züchtungsfortschritts zur Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks

Donghui Ma, Holger Zetzsche, Andreas Stahl und Til Feike

### ZIELSETZUNG

Die Züchtungsforschung und Züchtung verbesserter Sorten haben einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung der Ertragsleistung und Krankheitsresistenzen geleistet und so substantiell zur Erhöhung der Produktivität im Ackerbau über die vergangenen Jahrzehnte beigetragen. Inwieweit verbesserte Sorten auch helfen THG-Emissionen zu mindern ist bisher wenig erforscht. Daher zielt KlimZucht auf die Bewertung des Beitrags des Züchtungsfortschritts zur Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks der Pflanzenproduktion in Deutschland und zur Bewertung der weiteren züchterischen Potentiale ab. Die spezifischen Ziele sind die Bewertung,

- des Einflusses verschiedener N<sub>2</sub>O-Emissions-Abschätzungsmethoden auf den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck verbesserter Sorten
- des genetischen und nicht-genetischen Trends von Ertrag, THG-Emissionen und CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks wichtiger Getreidearten in Deutschland
- des Einflusses von Standort, Jahr und Sorte auf die Varianz von Ertrag, THG-Emissionen und CO<sub>2</sub>-Fußabdruck
- des Einflusses des Alterungseffekts von Sorten auf deren CO<sub>2</sub>-Fußabdruck

Die Ergebnisse sollen nachhaltige, klimaangepasste Züchtungsstrategien für mehr Klimaschutz unterstützen.

### METHODIK

Die Datengrundlage für das Projekt bilden die freundlicherweise durch das Bundessortenamt bereitgestellten deutschlandweiten Wertprüfungsdaten für Getreide (Tab. 1).

Tabelle 1: Übersicht über die verwendeten Wertprüfungsdaten

	Winterweizen	Winterroggen		Sommergerste		Wintergerste		Wintertriticale
		Population	Hybrid		2-reihig	6-reihig		
Anzahl Orte	115	104	105	120	133	134		76
Erstes Jahr	1983	1985	1985	1983	1984	1984		1988
Letztes Jahr	2021	2021	2021	2021	2021	2021		2019
Anzahl Sorten	458	28	81	250	177	180		94
Anzahl G × E × M	64,248	7,584	16,194	37,293	15,558	15,181		10,941

Die Analysen erfolgten mittels gemischter linearer Modelle, um Varianzkomponenten, genetische und nicht-genetische Trends sowie Alterungseffekte zu schätzen. Für die Bewertung der THG-Emissionen der Pflanzenproduktion wurde eine partielle Lebenszyklusanalyse (LCA) von der Wiege bis zum Hoftor (cradle-to-farm gate) durchgeführt. Die Abschätzung der THG-Emissionen erfolgte basierend

### HIGHLIGHTS

- N<sub>2</sub>O-Emissions-Abschätzungsmethode als größte Unsicherheitsquelle des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks (CFP) von Weizen identifiziert
- Analyse des Züchtungsfortschritts über 30 Jahre zeigt Verbesserung im CFP aller Getreidearten trotz negativer Umweltrends
- Alterungseffekte verschlechtern CFP – regelmäßige Sortenerneuerung für mehr Klimaschutz im Ackerbau empfohlen

auf Daten zu den verschiedenen Arbeitsschritten in jedem einzelnen Versuch wie Bodenbearbeitung, Düngung, Pflanzenschutz und Ernte, wobei ein praxisüblicher Maschinenpark angenommen wurde, um die Übertragbarkeit der Ergebnisse in die Praxis sicherzustellen.

### ERGEBNISSE

#### Einfluss des N<sub>2</sub>O-Emissions-Abschätzungsmethode

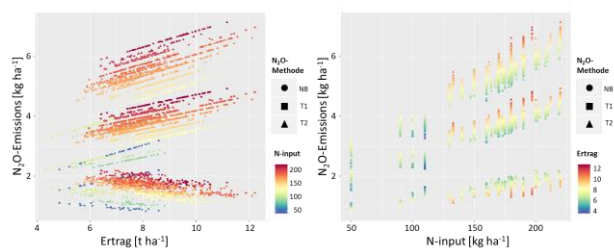


Abbildung 1: N<sub>2</sub>O-Emissionen kalkuliert nach den drei Methoden Nitrogen Balance (NB) (Eagle et al., 2020), sowie IPCC Tier 1 (T1) und Tier 2 (T2) (Mathivanan et al., 2021) im Verhältnis zum Ertrag und N-input

Der Vergleich unterschiedlicher N<sub>2</sub>O-Emissions-Abschätzungsmethoden zur Bewertung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks des Weizenanbaus 2017-2021 zeigte signifikante Unterschiede. Die Emissionen nach Tier 1 lagen am höchsten, gefolgt von Tier 2 und dem Nitrogen Balance (NB)-Ansatz mit den niedrigsten Emissionen. Weiterhin zeigte sich, dass die Emissionen bei höheren Erträgen bei Tier 1 und 2 ansteigen, während sie bei NB abnahmen (Abb. 1, links). Gleichzeitig stiegen die Emissionen bei Tier 1 und 2 mit steigendem N-Input stark an, während der Anstieg bei NB wesentlich geringer ausfiel. Während NB eine bessere Stickstoffeffizienz bei höheren Erträgen in geringere Verluste und N<sub>2</sub>O-Emissionen übersetzt, ist dies bei den einfachen Tier 1 und 2 Ansätzen nicht möglich. Dass die gängigen Tier 1 und 2 Ansätze verbesserte NUE durch steigende Erträge bei gleichbleibendem N-Input nicht umfassend berücksichtigen, stellt eine Herausforderung bei der Bewertung und Weiterentwicklung klimaintelligenter Anbaustrategien dar.



## KLIMAWIRKUNG

- Bei Produktionsmengen von 2, 9 und 20 Mio. t für Triticale, Wintergerste und Winterweizen hat der Züchtungsfortschritt in den letzten Jahrzehnten zu einer THG-Minderung von jährlich ~5.000, 16.000 und 25.700 t CO<sub>2</sub>-Äq pro Jahr geführt.
- Eine regelmäßige Nutzung der neuesten Sorten gegenüber einem längerfristigen Anbau derselben Sorten ermöglicht zusätzliches THG-Minderungspotenzial von mehreren 10.000 t CO<sub>2</sub>-Äq pro Jahr im Getreideanbau.

### Erklärung der Varianz im Getreide-CO<sub>2</sub>-Fußabdruck

Die Varianzanalysen zeigten, dass Umweltfaktoren (Standort und Standort × Jahr) den größten Teil der Variation in Ertrag, THG-Emissionen pro Hektar (GHGL) und CO<sub>2</sub>-Fußabdruck (CFP) erklären. Für den Ertrag war die Interaktion Standort × Jahr mit bis zu 53 % der Gesamtvarianz am bedeutendsten. Die genetische Varianz (Sorteneffekt) trug je nach Kultur zwischen 0,5 % (Hybridroggen) und 8,7 % (Winterweizen) bei. Für GHGL war der Standort der dominierende Faktor mit bis zu 70 % Varianzanteil. Der Sorteneffekt war vernachlässigbar (< 0,3 %). Beim CFP zeigten sich stärkere genetische Effekte (bis 3,3 %).

### Genetische und nicht-genetische Trends im CO<sub>2</sub>-Fußabdruck

Die Trendanalysen ergaben bei allen Kulturen positive genetische Ertragsentwicklungen, das heißt moderne Sorten erzielen höhere Erträge als alte Sorten. Die höchsten jährlichen Zuwächse wurden bei Wintertriticale (1,66 %) und Hybridroggen (1,20 %) festgestellt. In vielen Fällen kompensierte dieser genetische Fortschritt ungünstige nicht-genetische Trends, die durch leicht sinkende Düngeintensitäten und insbesondere zunehmend ungünstige Witterung in den letzten Jahren zu erklären sind.

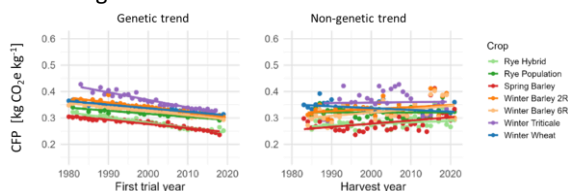


Abbildung 2. Entwicklung der genetischen und nicht-genetischen Trends im CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der verschiedenen Getreidearten über knapp vier Jahrzehnte

GHGL-Trends stiegen in mehreren Kulturen leicht an, mit dem stärksten Anstieg bei Wintergerste von über 1 % pro Jahr, vor allem durch nicht-genetische Entwicklungen. Beim CFP hingegen waren die genetischen Trends meist negativ. Wintertriticale erreichte eine jährliche CFP-Reduktion von

-1,41 % und Wintergerste von -0,64 %. Diese Verbesserungen resultieren hauptsächlich aus der höheren Ertragsleistung moderner Sorten.

### Verschlechterung im CO<sub>2</sub>-Fußabdruck durch Sortenalterung

Desto länger eine Sorte im Anbau ist, desto stärker verliert sie ihre Resistenz gegenüber biotischen Schadorganismen. Dieser sogenannte Alterungseffekt führt zu geringerer Ertragsleistung mit negativen Effekten auf den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck. Die Analysen der Sortenversuchsdaten seit den 1980er Jahren zeigen signifikante Alterungseffekte. Für Wintertriticale verschlechterte sich der CFP pro Anbaujahr im Mittel um +0,59 %. Auch Winterweizen (+0,28 %) und Gerste (+0,16 %) zeigten kleinere, jedoch signifikant negative Effekte.

### SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Ergebnisse der Analysen über mehr als 30 Jahre Pflanzenzüchtung zeigen, dass der Züchtungsfortschritt maßgeblich zur Produktivitätssteigerung, Effizienzsteigerung und Verbesserung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks (CFP) im deutschen Getreideanbau beiträgt. Der Verlust von Resistenzen mit zunehmendem Sortenalter (Alterungseffekt) verschlechtert dabei insbesondere den CFP. Das Projekt hat gezeigt, dass Züchtung und Anbau moderner standort- und klimaoptimierter Getreidesorten maßgeblich zum Klimaschutz beitragen. Für die landwirtschaftliche Praxis ist die Nutzung moderner Sorten und regelmäßiger Sortenwechsel für eine klima- und ressourcenschonende Getreideproduktion dringend empfohlen.

Die häufig genutzten Tier 1 und Tier 2 Methoden zur Abschätzung der N<sub>2</sub>O-Emissionen sind wenig geeignet um die Ertrags- und Effizienzsteigerungen durch die Pflanzenzüchtung für verbesserte klimaschonende Anbaustrategien sinnvoll abzubilden. Methoden, wie prozessbasierte Tier 3 Modellierungsansätze oder die im Projekt genutzte N-Balance Methode sollten hierbei vorrangig genutzt werden.

### AUSGEWÄHLTE VERÖFFENTLICHUNGEN

Ma, D, Riedesel, L, Lichthardt, C, Rentel, D, Laidig, F, Piepho, H-P, Feike, T (2023): Sensitivity analysis of wheat carbon footprints in Germany. Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss. 33:247-248.

Ma, D, Riedesel, L, Lichthardt, C, Rentel, D, Laidig, F, Piepho, H-P, Feike, T (2024): Breeding progress in terms of carbon footprint reduction for five cereal crops in Germany. Book of Abstracts, 18<sup>th</sup> Congress of the European Society for Agronomy, 152-153.

### Handlungsempfehlungen für Politik und Praxis

Die Förderung von Züchtungsforschung und Züchtung verbesserter Sorten hat einen effektiven Beitrag zur Verringerung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks der Pflanzenproduktion über die vergangenen Jahrzehnte geleistet. Die Förderung des Pre-breeding insbesondere für kleine Kulturen, aber auch Pflanzeigenschaften, die nicht vorrangig durch den Markt nachgefragt werden, wie hohe Stickstoffnutzungseffizienz und geringer CO<sub>2</sub>-Fußabdruck, stellt eine sehr zielführende Klimaschutzstrategie dar, damit neue verbesserte Sorten ohne zusätzliche staatliche Bemühungen ihren Weg in die Praxis finden. Eine Erhöhung des Bewusstseins, in der landwirtschaftlichen Praxis häufiger auf neue Sorten zu setzen, um den Alterungseffekt zu umgehen, birgt zusätzliches THG-Minderungspotenzial.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Landwirtschaft, Ernährung  
und Heimat

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

### N-optimierter Raps zur Reduktion der Treibhausgasemissionen

**Andreas Stahl, Ina Fischer, Dennis Löwe, Aida Taghavi Bayat, Heike Gerighausen, Michelle Viswanathan, Donghui Ma, Ahmed Attia, Dima Sabboura, Til Feike, Jonathan Brassac, Sebastian Warnemünde und Benjamin Pommerrenig**

#### ZIELSETZUNG

Stickstoff ist für das Wachstum von Pflanzen unverzichtbar und wird in der Landwirtschaft weltweit eingesetzt, um hohe Erträge zu sichern. Die Produktion und Nutzung von Stickstoffdünger verursacht jedoch erhebliche Treibhausgasemissionen, vor allem durch den energieintensiven Herstellungsprozess und den Ausstoß von Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ).

Raps ist eine Kulturpflanze mit hohem Stickstoffbedarf, zeichnet sich jedoch durch eine vergleichsweise geringe Stickstoffnutzungseffizienz (NUE) aus. Ziel des Projekts ist es, die Ökobilanz des Winterrapsanbaus zu verbessern, indem die N-Effizienz gezielt gesteigert wird. Dazu soll die Selektion stickstoffeffizienter Genotypen beschleunigt werden - durch den Einsatz drohnengestützter, multispektraler Phänotypisierung in Kombination mit genomweiten Vorhersagemodellen.

#### METHODIK

Das Projekt bestand aus zwei parallel durchgeführten Feldexperimenten für drei aufeinanderfolgende Wachstumsperioden (2022/23, 2023/24 und 2024/25) mit einem Modellkalibrierungsexperiment und einem Hauptexperiment.

An den Standorten Braunschweig und Quedlinburg wurden in den drei Versuchsjahren insgesamt drei Stickstoffsteigerungsversuche im Winterraps mit jeweils 4 bzw. 5 Genotypen, 5 N-Stufen mit 80 bis 240 kg N/ha bzw. 120 bis 240 kg N/ha und 4 bzw. 3 Wiederholungen erfolgreich angebaut. Für den Hauptversuch wurden 297 verschiedene Testhybrid-Genotypen, die von 39 Mutter- und 148 Vaterlinien abstammen, über die zwei ersten Versuchsjahre im Feld an sechs deutschen Standorten unter zwei Stickstoffniveaus (geringe Düngung = 80 kg/ha [N1] und ausreichende Düngung = 180 kg/ha [N2], insgesamt acht Umgebungen) bewertet. Zusätzlich zur Standardphänotypisierung (z. B. Samenertrag und den Merkmalen der Saatgutqualität (Öl- und Proteingehalt) wurden die Feldversuche während der Vegetationsperiode regelmäßig mit Hilfe von Drohnen (UAV) phänotypisiert. Die Entwicklung der Rapsbestände an allen Standorten wurde in entscheidenden Wachstumsphasen vor und nach dem Winter sowie vor und nach der Blüte mittels multispektraler Sensorik aufgezeichnet. Die Befliegungen in Braunschweig und Quedlinburg erfolgten mit einem Multikopter (DJI M300/350) und einem multispektralen Kamerasystem (Micasense RedEdge-MX Dual). Darüber hinaus wurden im Jahr 2025 in Quedlinburg auf Feldern mit 200 weiteren Test-Hybridparzellen und zwei verschiedenen Düngemitteltypen (Nitrat und Ammonium zu 100 kg N/ha) Befliegungen durchgeführt. Zeitnah zu den Befliegungen erfolgte eine manuelle Erhebung der für die N-Effizienz relevanten

#### HIGHLIGHTS

- Self-Supervised-Learning-Methoden besitzen ein hohes Potenzial für die Entwicklung robuster, standortunabhängiger Phänotypisierungsmodelle. Umfangreiche und qualitativ hochwertige Referenzdaten sind hierfür unerlässlich.
- Drohnengestützte Phänotypisierung unterstützt die Messung der Stickstoffeffizienz im Feld.
- Ausgewählte verbesserte Testhybride könnten den  $\text{CO}_2$ -Fußabdruck pro Kilo Winterraps mittelfristig um ca. 3 % senken

Bestandseigenschaften (z. B. Biomasse, Blattfläche, Pflanzenhöhe) nach einem standardisierten Samplingverfahren.

Alle UAV-Bilddaten wurden mit der Software PIX4Dmapper prozessiert, Orthophotos erstellt und mithilfe der Software PerClassMira Bodenmasken abgeleitet. Aus den maskierten Orthophotos wurden ausgewählte Vegetationsindizes (VIs z. B. NDVI, NDRE, OSAVI, MCARI, VARI) berechnet. Im Rahmen der Modellkalibrierung wurde die sensorgestützte Phänotypisierung mit verschiedenen Modellansätzen aus dem Bereich des Machine Learning (u. a. Random Forest, Self Supervised Learning) erprobt. Die Generalisierungsfähigkeit der Modelle wurde durch eine standortbasierte Kreuzvalidierung (leave-one-out) und eine gepoolte Zufallsauswahl (random selection) geprüft. Für die Testhybriden wurden diese VIs als Zeitreihen analysiert und mittels generalisierter additiver Modelle (GAM) geglättet. Die Zeitreihen wurden dann in vegetative (vor der Blüte) und senescente (nach der Blüte) Phasen unterteilt. Schließlich wurden dynamische Merkmale abgeleitet, wie beispielsweise die Fläche unter der Kurve (AUC) für beide Phasen und deren Summe.

Die genomweiten molekulargenetischen Markerdaten (Single Nucleotide Polymorphism, SNPs) wurden von Züchtungsunternehmen für die elterlichen Genotypen bereitgestellt. In Kombination mit den dynamischen Merkmalen wurden diese Daten verwendet, um die Möglichkeit zu bewerten, die genomweite Vorhersage der Merkmale, einschließlich Samenertrag und NUE, zu verbessern. Die Daten wurden mithilfe einer genomischen Vorhersagepipeline analysiert. Diese wertet mehrere statistische und maschinelle Lernmodelle (GBLUP, BayesB, RKHS und XGBoost) über Kreuzvalidierungsfalten aus, um komplexe phänotypische Merkmale aus dem Genotyp (SNP-Marker) und zusätzlichen Kovarianten (z. B. PCs und VI-Merkmale) vorherzusagen. Die Pipeline führt eine verschachtelte Abstimmung und Regularisierung durch, um die Hyperparameter des Modells zu optimieren und gleichzeitig die

Überanpassung zu kontrollieren. Zudem quantifiziert sie die Vorhersagegenauigkeit mithilfe von kreuzvalidierten Korrelationen und dem mittleren quadratischen Fehler (RMSE) zwischen beobachteten und vorhergesagten Merkmalswerten.

Die  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen und der  $\text{CO}_2$ -Fußabdruck im Zusammenhang mit dem Anbau von Winterraps wurden durch mehrere Ansätze bewertet. Zunächst wurde das DSSAT-DayCENT-Modell hinsichtlich seiner Genauigkeit für Tier-3-Treibhausgasberichterstattung untersucht, indem die Simulationen mit gemessenen  $\text{N}_2\text{O}$ - und  $\text{CO}_2$ -Emissionen an drei Standorten in Deutschland verglichen wurden. Um die Umweltkomponente (E) von GxExM-Interaktionen zu bewerten, wurde die Bodenunsicherheit in den modellierten Tier-3  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen mittels Bayesscher Inferenz berücksichtigt. VCU-Prüfdaten (1992–2021) wurden analysiert, um den Beitrag der Pflanzenzüchtung zu Ertragssteigerungen und Veränderungen im  $\text{CO}_2$ -Fußabdruck anhand von Tier-2  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionsschätzungen zu bewerten. Abschließend wurden eine 'cradle-to-farmgate' Lebenszyklusanalyse und trade-off-Analysen durchgeführt, um NORA-Testhybride mit niedrigem  $\text{CO}_2$ -Fußabdruck und hoher Produktivität zu identifizieren und so die Auswahl nachhaltigerer Sorten zu unterstützen.



Abbildung 1: Drohnenflug während der Vegetation. Quelle: Sebastian Warenmünde (JKI)

## ERGEBNISSE

Bei den Testhybriden schwankte der Samenertrag (SY) über beide Vegetationsperioden hinweg zwischen 2,55 und 4,15 t/ha für N1 bzw. zwischen 3,19 und 4,54 t/ha für N2 (Tab. 1). Für die Gruppe der Testhybriden, die über beide Jahre hinweg untersucht wurden, war die Heritabilität im weiteren Sinne für den Samenertrag mit  $h^2 = 0,63$  mäßig hoch. In allen Umgebungen war die NUE bei der Behandlung mit N1 erwartungsgemäß höher als bei der Behandlung mit N2. Im Durchschnitt lag sie über die gesamte Studie hinweg bei 35,99 bzw. 19,63 kg Kornertrag pro kg Stickstoffdünger bei geringer bzw. hoher Düngung. Die Heritabilität im weiteren Sinne für die NUE war mäßig hoch ( $h^2 = 0,60$ ).

In allen Umgebungen war die Ölkonzentration (OilC) in der N1-Behandlung erwartungsgemäß höher als in der N2-Behandlung. Im Durchschnitt lag sie über die gesamte Studie hinweg bei 55,71 % bei geringer und bei 52,13 % bei hoher Düngung. Wie aufgrund der negativen Korrelation zwischen Öl- und Proteingehalt zu erwarten war, war die Proteinkonzentration (ProtC) bei N2 höher als bei N1. Im Durchschnitt lag sie bei 17,01 % bzw. 20,39 % bei geringer

bzw. hoher Düngung. Die Heritabilität im weiteren Sinne erwies sich sowohl für OilC als auch für ProtC mit  $h^2 = 0,90$  bzw.  $h^2 = 0,80$  als relativ hoch.

Die aus den VIs abgeleiteten sekundären Merkmale wiesen eine moderate bis starke Korrelation mit den interessierenden Merkmalen auf. Im Allgemeinen waren die Korrelationen bei der Behandlung mit hohem Düngemiteleinsatz höher als bei der Behandlung mit niedrigem Düngemiteleinsatz. Außerdem waren sie für die AUC der Seneszenzphase oder der gesamten Saison höher als für die Vegetationsphase. So wurden beispielsweise Werte von bis zu  $r = 0,71$  für den Samenertrag unter hohem Stickstoffeinsatz und die OSAVI-AUC für die gesamte Saison erreicht.

Tabelle 1: Phänotypische Werte der Testhybriden für ausgewählte Merkmale in jeder Jahres- × N-Kombination (angepasste Mittelwerte ± Standardfehler).

Jahr	N	SY [t/ha]	NUE	OilC [%]	ProtC [%]
2023	N1	3.38 ± 0.36	34.49 ± 3.41	57.69 ± 1.09	16.37 ± 0.71
		3.71 ± 0.39	18.74 ± 1.84	53.34 ± 1.19	20.97 ± 0.71
	N2	3.54 ± 0.3	38.26 ± 3.25	53.56 ± 0.94	17.68 ± 0.5
		3.91 ± 0.33	19.98 ± 1.75	50.4 ± 1.1	19.61 ± 0.56
2024	N1	3.43 ± 0.26	35.99 ± 2.82	55.71 ± 0.84	17.01 ± 0.53
		3.87 ± 0.29	19.63 ± 1.49	52.13 ± 1.02	20.39 ± 0.6
	N2				

SY: Samenertrag; NUE: Stickstoffnutzungseffizienz; OilC: Ölkonzentration; ProtC: Proteinkonzentration.

Unter den getesteten Algorithmen zur sensorbasierten Phänotypisierung relevanter Parameter zur Verbesserung der N-Effizienz von Winterraps erwies sich das selbstüberwachte Lernen (SSL) unter Verwendung eines TabTransformers und kontrastiven Lernens zur Datenerweiterung anderen Verfahren wie beispielsweise Random Forest überlegen. Hierfür wurde in einem zweistufigen Ansatz zunächst ein auf Self-Supervised Learning (SSL) basierendes TabTransformer-Modell anhand von unbeschrifteten Stichproben der UAV-Bilddaten, einzelnen Spektralbändern und Vegetationsindizes, sowie zusätzlichen abiotischen Prädiktoren trainiert.

Im Anschluss erfolgte eine Feinabstimmung des vortrainierten SSL-Modells mit einer begrenzten Anzahl markierter Proben aus bekannten Regionen. Die Modellgüte für die getesteten Verfahren variiert in Abhängigkeit der Generalisierungsstrategie nach Parameter, Standort und Jahr. Die SSL-Modelle erzielten Werte zwischen  $R^2=0,65$  – 0,88 bei der Schätzung des N-Gehaltes. Für die Schätzung der Biomasse wurden Werte zwischen  $R^2=0,60$  – 0,68 erzielt. Self-Supervised-Learning-Verfahren eignen sich besonders für standortübergreifende Anwendungen der sensorbasierten Phänotypisierung, da sie robuste, datengestützte Repräsentationen erlernen können, die weniger abhängig von spezifischen Umwelt- und Standortbedingungen sind. Dennoch bleibt die Verfügbarkeit umfangreicher und qualitativ hochwertiger

## KLIMAWIRKUNG

Die Pflanzenzüchtung hat bereits zur Verringerung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks von Winterraps in Deutschland beigetragen. Für standortspezifische Minderungsstrategien werden prozessbasierte Modelle empfohlen, die Unsicherheiten bei N<sub>2</sub>O-Emissionen berücksichtigen. Drohnengestützte Phänotypisierung ermöglicht eine schnelle Bewertung nachhaltiger Genotypen unter unterschiedlichen Umweltbedingungen.

Referenzdaten essenziell, um diese Modelle zu kalibrieren, zu validieren und ihre Übertragbarkeit sicherzustellen.

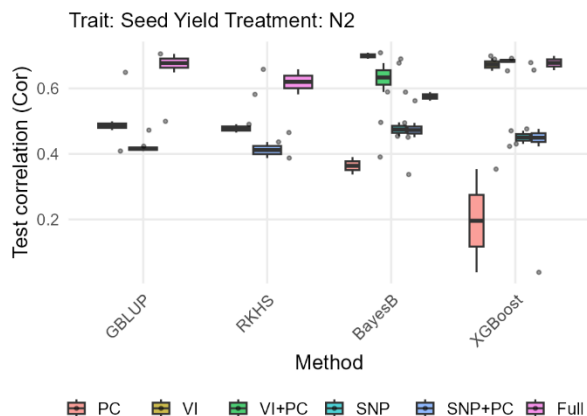


Abbildung 2: Vergleich von Methoden (GBLUP, BayesB, RKHS und XGBoost) und Modellen (PC, VI, VI+PC, SNP, SNP+PC und Full) für die genomische Vorhersage des Quedlinburg 2024-Saatgutertrags in der Variante N2. PC, Hauptkomponenten der SNP-Matrix; VI, Vegetationsindizes AUC.

Bei der genomischen Vorhersage verbesserte die Einbeziehung von Vegetationsindizes (VIs) in das Vorhersagemodell die Leistung von GBLUP, RKHS und XGBoost deutlich (s. Abb. 2). Dabei zeigten sich ergänzende Informationen aus den VIs. BayesB schnitt mit VI allein am besten ab ( $r = 0,70$ ; RMSE = 0,38). Die Hinzufügung von PCs oder SNPs erhöhte hingegen den Fehler, was auf eine übermäßige Schrumpfung der Parameter aufgrund spärlicher Priors in hochdimensionalen Einstellungen hindeutet. XGBoost erreichte seine höchste Genauigkeit bei der Kombination von VIs und PCs ( $r = 0,68$ ; RMSE = 0,39). Modelle, die nur PCs oder SNPs verwendeten, schnitten dagegen deutlich schlechter ab.

Die Studie zeigte, dass das DSSAT-DayCENT-Modell N<sub>2</sub>O- und CO<sub>2</sub>-Emissionen mit angemessener Genauigkeit simulierte, was seinen Einsatz für Tier-3-Schätzungen unterstützt – allerdings ist eine standortspezifische

Kalibrierung erforderlich, um die Modellleistung zu verbessern. Unsicherheiten in den Bodeneigenschaften beeinflussen Tier-3 N<sub>2</sub>O-Emissionsschätzungen und die Studie zeigt einen Ansatz auf, wie diese Unsicherheiten in regionalen, deutschlandweiten Bewertungen berücksichtigt werden können. Die Pflanzenzüchtung hat bislang zu einer jährlichen Reduktion des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks um etwa 1 % beigetragen. Dieser Fortschritt wurde jedoch durch den Klimawandel und veränderte Bewirtschaftungspraktiken teilweise wieder aufgehoben. Abschließend ermöglichte eine Trade-off-Analyse auf Basis von Öl- und Proteinertrag sowie CO<sub>2</sub>-Fußabdruck die Identifikation nachhaltiger Testhybride.

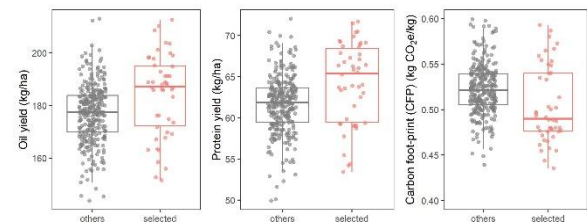


Abbildung 3: Ausgewählte Testhybride weisen im Durchschnitt ca. 3 % höhere Proteinerträge und Ölerträge sowie einen 3 % geringeren CO<sub>2</sub>-Fußabdruck im Vergleich zu den übrigen Testhybriden auf.



Abbildung 4: Luftaufnahme der Rapsparzellenversuche. Quelle: Sebastian Warenmünde (JKI)

## SCHLUSSFOLGERUNGEN

**Züchtung** stellt einen starken Hebel für die **Verbesserung der Stickstoff- und Ressourceneffizienz** dar und steht nicht im Konflikt mit der Erreichung anderer Ziele.

## HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN FÜR POLITIK UND PRAXIS

Die Rahmenbedingungen für die **Forschung** und **Züchtung** sollten darauf ausgerichtet werden, durch leistungsfähige Zuchtprogramme weiterhin **Produktivitätssteigerung** und **Umwelt-/Klimaschutz in Einklang** zu bringen.

Ein Übergang zu Tier-3-Schätzungen von Treibhausgasemissionen, kombiniert mit Unsicherheitsanalysen, sollte in **Lebenszyklusanalysen** (LCA) integriert werden, um zuverlässige **Bewertungen der Klimawirkung** zu ermöglichen.

Investitionen in **digitale Phänotypisierung**, um eine schnelle Identifikation standortspezifisch nachhaltiger Genotypen mit geringem CO<sub>2</sub>-Fußabdruck (CFP) und hohen Erträgen zu ermöglichen.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Landwirtschaft, Ernährung  
und Heimat

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



### Optimierung des Potentials von Halbzweigen bei Roggen für die Steigerung der Klimaschutzleistung von Getreidefruchtfolgen

Bernd Hackauf, Anne Zaar, Thomas Kämpfer, Ashifur R. Shawon, Lorenz Kottmann und Til Feike

#### ZIELSETZUNG

Das Projekt adressierte am Beispiel des Roggens den Beitrag der Pflanzenzüchtung zum Klimaschutz. Roggen besitzt im Hinblick auf seine Reproduktionsbiologie ein Alleinstellungsmerkmal unter den kleinkörnigen Getreidearten. Seine obligate Fremdbefruchtung ist eine evolutionär geprägte Fortpflanzungsstrategie, die eine genetische Anpassung an sich stetig ändernde Umweltbedingungen gewährleistet. Roggen ist als Brotgetreide in die Getreidewertschöpfungskette integriert und ermöglicht außerdem eine nachhaltige Produktion energiereicher, hofeigener Futtermittel. Aus züchterischer Sicht führt Fremdbefruchtung zu einer besonderen methodischen Komplexität, um den Roggen an die Bedürfnisse von Landwirten, Verbrauchern und Umwelt anzupassen.

Modellierungen und Treibhausgasbilanzen zeigen, dass Roggen im Vergleich zu Weizen einen geringeren CO<sub>2</sub>-Fußabdruck aufweist. Konservative Szenarien verdeutlichen jedoch, dass selbst bei einer großflächigen Ausweitung des Roggenanbaus von gegenwärtig 0,5-0,6 Million Hektar auf über eine Million Hektar das nationale THG-Minderungspotenzial begrenzt bleibt. Roggen kann somit einen spürbaren Beitrag leisten, die Klimaschutzziele im Ackerbau aber nicht allein durch Flächenverschiebung erfüllen. Entscheidend ist die Kombination aus angepasster Sortenwahl, verbesserter Bestandsführung und effizienten Fruchtfolgen. Es wurde untersucht, wie sogenannte „Halbzweige“, d.h. Roggen mit genetisch vermittelter Halmverkürzung, zur Minderung landwirtschaftlicher Treibhausgasemissionen beitragen und gleichzeitig die Ertragsstabilität unter Klimastress sichern können.

Zentrale Aufgabe des Projektes war die Fortführung eines 2020 am JKI etablierten Pre-Breeding-Programms zur Entwicklung nachbaufähiger, kurzstrohiger Roggenpopulationen, die für ökologische und ressourcenschonende Systeme attraktiv sind. Nach Marktangaben entfallen in Deutschland etwa 70 % der Roggenanbaufläche auf Hybridsorten. Populationsroggen spielt flächenmäßig eine deutlich kleinere, funktional aber zentrale Rolle: als Goldstandard in der Bewertung der Mutterkornabwehr nach künstlicher Inokulation, als nachbaufähige Option im ökologischen Landbau und als genetische Ressource für die Zukunft des Roggenanbaus. Der stetige Anbau nachbaufähiger Populationen bewahrt die evolutionär bewährte Anpassungsfähigkeit des Roggens in der Fläche, eine entscheidende Funktion zur Sicherung der Getreideproduktion im Zeichen des anthropogenen Klimawandels. Um die Attraktivität des Roggenanbaus zu erhöhen, zielte PRoKlima auch darauf ab, die methodischen Grundlagen für

#### HIGHLIGHTS

- Kurzstrohige, nachbaufähige Populationen entwickelt.
- Ausgeprägte Standfestigkeit auch bei hoher Saatstärke.
- Tier-2-Emissionsbilanzen zeigen: Roggen ist deutlich emissionsärmer als Weizen.

die Entwicklung von Roggen mit definierten Kornqualitäten zu verbessern.

Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der Frage, wie Roggen zum Klimaschutz beitragen kann. Dazu wurden standort-spezifische Emissionsbilanzen, agronomische Eigenschaften und Qualitätsparameter miteinander verknüpft.

#### METHODIK

Die Arbeiten kombinierten marker-gestützte Kreuzungsarbeiten, Feldversuche, Qualitätsanalytik, Modellierungen und Ökobilanzierung:

##### Populationsentwicklung

- Kurzstrohige Vollgeschwisterfamilien in Populationen der Genpools Carsten und Petkus erstellt
- Ökologische Erhaltungssorten *Norddeutscher Champagner*, *Mecklenburger Marienroggen* und *Heines Hellkornroggen* in das Pre-Breeding integriert

##### Feldversuche

- Exaktversuche in acht Regionen über zwei Jahre
- Drei Saatstärken, ökologische Varianten, 18 Umwelten
- Untersuchungen zu Ertrag, Standfestigkeit, Stressreaktionen

##### Präzisionsphänotypisierung

- Rainout-Shelter zur Simulation definierter Trockenstresstufen
- Rhizotron-Analysen bis 1,5 m Tiefe
- Gefäßversuche zur Untersuchung früher Wachstumsphasen

##### Qualitätserfassung (NIRS)

- Entwicklung und Validierung einer NIR-Kalibrierung
- Präzise Bestimmung von Protein, Stärke, Arabinoxylanen

##### Ökobilanzierung und Modellierung

- Treibhausgasbilanzierung nach IPCC-Tier-2
- Analyse deutschlandweiter Datensätze zum Roggen- und Weizenanbau
- Vergleichende Bewertung der THG-Emissionen für verschiedene Bodengütecluster
- Wachstums- und Ertragssimulationen mit CERES-Rye

#### ERGEBNISSE

##### Pre-Breeding für nachhaltige Anbausysteme

Ein zentrales Ergebnis von PRoKlima ist der Aufbau eines Materials für ressourcenschonende und ökologische Anbausysteme. In PRoKlima wurden 132 kurzstrohige,



## KLIMAWIRKUNG

Roggen weist im Vergleich zu anderen Getreidearten einen deutlich geringeren CO<sub>2</sub>-Fußabdruck auf, insbesondere durch seine geringeren Ansprüche an Stickstoff. Die Integration nachbaufähiger, innovativer Roggenpopulation mit genetischer Halmverkürzung bewahrt zugleich die bewährte Anpassungsfähigkeit des Roggens in der Fläche, eine entscheidende Funktion zur Sicherung der Getreideproduktion im Zeichen zunehmender Klimavariabilität.

selbst-inkompatible BC3-Vollgeschwisterfamilien (B3-VGF) im Genpool Petkus sowie 134 kurzstrohige B3-VGF im Genpool Carsten mit einer Saatgutmenge von insgesamt 48.115 Körnern erzeugt (Abb. 1). Nach phänotypischer Selektion auf Kornmerkmale wurden 116 dieser Vollgeschwisterfamilien für die Vermehrung unter Isolationsbedingungen im Jahr 2025 ausgewählt. Das Material offenbarte eine ausgeprägte phänotypische Variation im Hinblick auf Wuchshöhe, Blattgesundheit, Ertragsfähigkeit und Kornparametern. Die unerwünschte, rezessive Genvariante für Normalstrohigkeit konnte in keiner der Vollgeschwisterfamilien beobachtet werden. Dies ist ein erster Beleg für das Potenzial marker-gestützter Selektion für die Entwicklung innovativer Roggenpopulationen. Aus phänotypisch selektierten Vollgeschwisterfamilien wurden 238 reinerbig kurzstrohige, nachbaufähige Populationen entwickelt, die im Jahr 2026 unter Isolationsbedingungen auf 1 m<sup>2</sup>-Parzellen für weiterführende Studien vermehrt werden (Abb. 2).



Abbildung 1: Erstellung reinerbig kurzstrohiger BC3-Vollgeschwisterfamilien für den ökologischen Landbau.

Ergänzend zu dieser Materialgruppe wurden weitere 113 manuelle Rückkreuzungen des Kurzstrohgens *Ddw1* in eine Population des Formenkreises Petkus und 81 Rückkreuzungen in eine Population des Formenkreises Carsten durchgeführt. Das auf diese Weise erzeugte BC6-Saatgut trägt nun durchschnittlich mehr als 99 % des Erbguts der jeweiligen rekurrenten Elternpopulation und bildet die Basis für die Entwicklung des nächsten Zyklus bei der Entwicklung reinerbig kurzstrohiger Populationen.

*Ddw1* wurde in die Erhaltungssorten *Norddeutscher Champagnerroggen* und *Mecklenburger Marienroggen* eingekreuzt. In 836 Einzelpflanzen der Population *Heines Hellkorn* wurde die Ertragsfähigkeit durch phänotypische Selektion gegen ein mit einer Frequenz von 16 % häufig vorkommendes Selbstfertilitätsallel verbessert. Saatgut dieser Erhaltungssorten aus zertifiziert ökologischer

Landwirtschaft stand über die enge Zusammenarbeit mit VERN e.V. zur Verfügung.



Abbildung 2: Bestand von 238 nachbaufähigen Roggenpopulationen im Oktober 2025 zur pollenisolierten Vermehrung 2026 am JKI-Standort in Groß Lüsewitz.

## Leistungsprüfung in Zielumwelten

Die Hybridzüchtung leistete in PROKlima einen methodischen Beitrag zur wissenschaftlichen Bewertung des Kurzstrohgens *Ddw1*. Die Experimentalhybriden ermöglichten aufgrund ihrer Homogenität und Reproduzierbarkeit eine präzise Analyse der Reaktionsnormen von *Ddw1* über Standorte, Jahre und Saatstärken hinweg. Erst durch diese stabile genetische Basis konnten die physiologischen Effekte des Gens, etwa auf Bestockung, Kornfüllung, Standfestigkeit und Ertragsstabilität, eindeutig quantifiziert werden. Die Hybridzüchtung bildet damit eine unverzichtbare Grundlage für die züchterische Weiterentwicklung kurzstrohiger Roggenformen, unabhängig davon, ob diese später als Hybrid- oder Populationssorten genutzt werden. Unsere Saatstärkeversuche offenbarten, dass Halbzwerge im Gegensatz zu ihren nahezu isogenen, normalstrohigen Vollgeschwistern auch bei erhöhten Aussaatstärken eine ausgeprägte Standfestigkeit aufwiesen (Abb. 3). Dadurch lässt sich die Bestandsdichte und damit die Flächenproduktivität gezielt steigern, ohne ein erhöhtes Lagerrisiko in Kauf nehmen zu müssen.



Abbildung 3: Die Leistungsprüfung von Halbzwerge am JKI-Standort Groß Lüsewitz gab in 2024 Gelegenheit zum Gedankenaustausch mit Stakeholdern, beispielsweise im Rahmen der Sommertagung der GfPI-Abteilung Getreide.

Besonders für Populationssorten eröffnet dies neue Spielräume: Im Unterschied zu Hybriden, bei denen höhere Saatstärken aufgrund der Saatgutkosten wirtschaftlich begrenzend wirken können, erlaubt nachbaufähiger Populationsroggen eine kosten-effiziente Nutzung höherer Saatstärken. Die Kombination aus Standfestigkeit, Kompensationsvermögen und moderaten Saatgutkosten bietet somit eine klare Option, die Ertragsfähigkeit von Populationsroggen nachhaltig zu erhöhen.

Die NIR-Kalibrierung erwies sich als hochpräzise und wurde im Projekt weiterentwickelt. Protein, Stärke und Arabinoxylane lassen sich zerstörungsfrei und schnell

bestimmen. Damit wird eine effiziente Phänotypisierung großer Probenreihen dieser qualitätsbestimmenden Kornparameter ermöglicht und die gezielte Entwicklung von Halbzweigen mit definierten Kornqualitäten wesentlich erleichtert.

### Präzisionsphänotypisierung

Die zweijährige Präzisionsphänotypisierung von Halbzweigen und ihren normalstrohigen Vollgeschwistern wurde unter kontrolliertem Trockenstress und optimaler Bewässerung erfolgreich durchgeführt. In drei von vier Umwelten zeigte sich kein signifikanter Unterschied in der Ertragsleistung zwischen Halbzweigen und normalstrohigen Genotypen. Ein Gefäßversuch bestätigte unsere Beobachtungen im Feldbestand, dass das Kurzstrohgen *Ddw1* keinen negativen Einfluss auf das Wurzelsystem von Roggen hat (Abb. 4).



Abbildung 4: Gefäßversuch zur Wurzelphänotypisierung unter Freilandbedingungen und Niederschlagsausschluss.

### THG-Emissionsanalysen

Die vergleichende Bewertung der THG-Emissionen (Tier 2) von Winterweizen und Winterroggen basierend auf deutschlandweiten Langzeit-Versuchsdaten des Bundesortenamts ergab deutliche Unterschiede entlang des Bodenfruchtbarkeitsgradienten (Ackerzahl). Im Mittel über alle Standorte liegen die Emissionen wie folgt:

- Weizen: ca. 3540 kg CO<sub>2</sub>-Äq ha<sup>-1</sup>
- Hybridroggen: ca. 2645 kg CO<sub>2</sub>-Äq ha<sup>-1</sup>
- Populationsroggen: ca. 2560 kg CO<sub>2</sub>-Äq ha<sup>-1</sup>

Während die Emissionen bei Weizen auf guten Standorten signifikant höher liegen als auf schlechten Standorten, unterscheidet sich dies bei Hybridroggen nur geringfügig und bei Populationsroggen gar nicht. Dieses gegenläufige Muster unterstreicht das ausgewiesene Klimaschutzpotenzial des Roggens als extensive, klimaresiliente und stresstolerante Getreideart. Während Weizen auf gute Böden und hohe N-Verfügbarkeit angewiesen ist, um sein Potenzial auszuschöpfen, kann Roggen auf auch marginalen Böden gute Erträge bei vergleichsweise geringen Emissionen erzielen.

### HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN FÜR POLITIK UND PRAXIS

Prüfungen in multiplen Umwelten sind nötig, um die Wirkung von *Ddw1* in den erstmals entwickelten nachbaufähigen Populationen auf Ertrag, Standfestigkeit und Klimawirkung belastbar zu bewerten. Für kurzstrohige, nachbaufähige Populationsroggen wäre daher eine gezielte Unterstützung des Pre-Breedings im Bundesprogramm Ökologischer Landbau wünschenswert. Im ökologischen Landbau sollte geprüft werden, in welchem Umfang dieser Sortentyp dazu beitragen kann, die Ertragslücke zum integrierten Landbau zu verkleinern, ob höhere Saatstärken die geringere Strohstärke bei der Beikrautunterdrückung kompensieren und wie Halbzweige zur Biodiversität von Lebensgemeinschaften beitragen können.

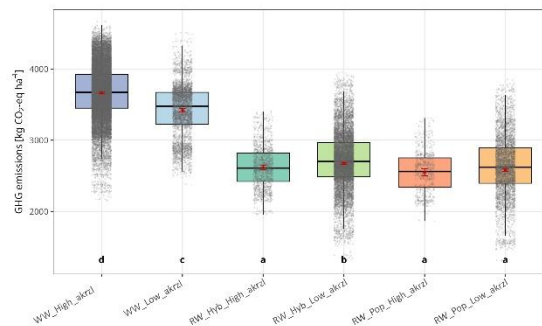


Abbildung 5: Durchschnittliche Treibhausgasemissionen (kg CO<sub>2</sub>-Äq ha<sup>-1</sup>) von Winterweizen und Winterroggen auf fruchtbaren (High\_akrzl) und kargen (Low\_akrzl) Böden in Deutschland. Die Abbildung vergleicht Weizen (WW) mit Roggen Hybrid- (RW\_Hyb) und Populationsorten (RW\_Pop).

### Prozessbasierte Modellierung

Die Simulationen des Roggenanbaus mit Hilfe des neu entwickelten CERES-Rye-Modells (Shawon et al., 2024) erlauben erste explorative Hinweise auf mögliche Ertragsreaktionen von Roggen im Klimawandel. Während die steigenden Temperaturen die Phänologie beschleunigen, was grundsätzlich kritisch zu sehen ist, wirkt der steigende CO<sub>2</sub>-Düngeeffekt ertragserhöhend. Die mit modellgestützten Langfristprojektionen einhergehenden Unsicherheiten erfordern jedoch weitere vertiefende modellwissenschaftliche Arbeiten, um den besonderen Anpassungsmechanismen von Roggen an den Klimawandel gerecht zu werden.

### SCHLUSSFOLGERUNGEN

Es konnte gezeigt werden, dass Roggen mit einer durch das Kurzstrohgen *Ddw1* vermittelten Halmverkürzung zentrale Beiträge zu klimafreundlichen, effizienten und resilienten Getreidesystemen leisten kann. Die Kombination aus Ertragsstabilität, geringerer Lageranfälligkeit, hoher N-Effizienz und reduzierten Emissionen macht Roggen zu einer starken Marktf Frucht mit Zukunft.

### AUSGEWÄHLTE VERÖFFENTLICHUNGEN

Shawon AR, Attia A, Ko J, Memic E, Uptmoor R, Hackauf B, Feike T (2025) Impact of calibration strategy and data on wheat simulation with the DSSAT-Nwheat model. *Agron J*, 117 (4), e70111. <https://dx.doi.org/10.1002/agj2.70111>

Shawon AR, Memic E, Kottmann L, Uptmoor R, Hackauf B, Feike T (2024) Comprehensive evaluation of the DSSAT-CSM-CERES-Wheat for simulating winter rye against multi-environment data in Germany. *Agron J*, 116 (4), 1844-1868. <https://dx.doi.org/10.1002/agj2.21590>

Riedesel L, Ma D, Piepho HP, Laidig F, Möller M, Golla B, Kautz T, Feike T (2024) Climate change induced heat and drought stress hamper climate change mitigation in German cereal production. *Field Crops Res*, 317, 109551. doi 10.1016/j.fcr.2024.109551

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Landwirtschaft, Ernährung  
und Heimat

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



## CatchHedge

01.11.2022-31.12.2025

### Heckenneuanlagen und ihre positiven Effekte fördern

Sofia Heukrodt, Marion Kruse, Marghitta Landmann, Hannah Lembke und Berit Schütze

#### ZIELSETZUNG

Hecken erbringen vielfältige Funktionen wie Boden- und Erosionsschutz und leisten einen wichtigen Beitrag zum Erhalt der Biodiversität. In den letzten Jahren ist zusätzlich die hohe Kohlenstoffspeicherleistung von Hecken in den Fokus gerückt. Sie binden CO<sub>2</sub> in der aufwachsenden Biomasse und langfristig als Humus im Boden und können somit die C-Senkenleistung in der Agrarlandschaft erhöhen.

Allerdings werden nur wenige neue Hecken in Deutschland angelegt. Ziel des Projekts „Kohlenstoffsequestrierung in Hecken und Feldgehölzen (CatchHedge)“ war deshalb, die Neuanlage von dauerhaften Gehölzstrukturen in Form von Hecken als Klimaschutzoption umfassend zu quantifizieren und zu bewerten. Dabei sollten die möglichen Effekte von Hecken auf angrenzende landwirtschaftliche Flächen und die Biodiversität sowie verschiedene Nutzungsoptionen berücksichtigt und die Rentabilität von Heckenneuanlagen inkl. Opportunitätskosten betrachtet werden. Darauf aufbauend sollte aufgezeigt werden, wie unter Berücksichtigung des rechtlichen Rahmens Umsetzungsanreize, insbesondere Förderprogramme zum Heckenausbau, gestaltet werden können. Zudem sollte eine Potenzialanalyse für die Neuanlage von Hecken durchgeführt und das daraus resultierende Kohlenstoffspeicherpotenzial aufgezeigt werden.



Abbildung 1: Eine der untersuchten Feldhecken in Thüringen in blühender Landschaft (Thünen-Institut / Heukrodt).

#### METHODIK

- Datenerhebung an ausgewählten Standorten in Deutschland (Abb. 1) und statistische Auswertung
  - Bodenwassergehalt und Ernteerträge auf angrenzenden Ackerflächen
  - Vegetation, Laufkäfer und Webspinnen in Hecken und im Heckensaum
- Literatur- und Datenrecherche
  - Ordnungsrecht und Förderprogramme
  - Umsetzung von Förderprogrammen
  - Hemmnisse bei der Heckenneuanlage
  - Nutzungsoptionen von Hecken

#### HIGHLIGHTS

- Es gibt noch viel Potenzial für Heckenneuanlagen. Neue Hecken können einen wichtigen Beitrag zum Erreichen der Klimaschutzziele leisten.
  - 2400 m Hecke mit verschiedenen Nutzungsoptionen wurden auf den Versuchsflächen des Thünen-Instituts für Ökologischen Landbau angelegt.
  - Im Rahmen unterschiedlicher Fragestellungen wurden insgesamt deutschlandweit 41 Hecken beprobt.
  - Im Projekt fand Dialog mit Hecken-Akteur\*innen aus ganz Deutschland statt. Zusätzlich wurden die Projektergebnisse in einem öffentlichen Workshop mit ca. 60 Personen diskutiert.
- Kosten von Heckenpflanzungen und -pflege und Erlöspotenziale
  - Effekt von Hecken auf die Biodiversität
  - Leitfadengestützte Interviews mit Expert\*innen in ausgewählten Bundesländern in Deutschland
    - Praxiserfahrung (Heckenneuanlage sowie Heckenpflege)
    - Kostenkalkulationen von Heckenpflanzungen
    - Nutzungsoptionen von Hecken bzw. Verwertung von Heckenpflagematerial
  - Auswertung räumlicher Daten
    - Räumliche Verteilung von Hecken in Deutschland
    - Ermittlung von Potenzialen für Heckenneuanlage
    - Berechnung des Klimaschutzpotenzials neu gepflanzter Hecken

#### ERGEBNISSE

##### Effekte von Hecken auf Biodiversität und Ertrag

Hecken können einen großen Beitrag zur Förderung der Biodiversität in Agrarlandschaften leisten und förderlich für verschiedenste taxonomische Gruppen inkl. gefährdeter Arten sein, wenn sie entsprechend angelegt und gepflegt werden. Sie sollten vielfältig gestaltet sein, d. h. es sollten mehrere Gehölzarten, möglichst mit verschiedenen Eigenschaften, gepflanzt werden, um ein breites und langanhaltendes Ressourcenangebot zur Verfügung zu stellen. Darüber hinaus ist das Vorhandensein eines Saums entscheidend für die Artenvielfalt, da dieser die geschlossene Vegetation der Hecke um Offenlandbereiche ergänzt und somit Heterogenität auf kleinem Raum schafft. Zudem können weitere biodiversitätsfördernde Strukturen wie z. B. Totholz integriert werden. Es gibt keine Hecke, die allen Arten gleichermaßen gerecht wird. Beispielsweise gibt es sowohl Arten, die von Bäumen in Hecken profitieren als auch Arten, die Hecken ohne Bäume bevorzugen, und obwohl für viele Arten große (breite, lange, hohe Hecken) förderlich sind, gibt es hier auch Ausnahmen. Es ist deshalb wichtig, sowohl die einzelne Hecke als auch die Gesamtheit der Hecken auf Landschaftsebene möglichst divers zu pflanzen. Ein essentieller Punkt für den positiven Beitrag

## KLIMAWIRKUNG

Die gesamte Heckenfläche in Deutschland beträgt aktuell etwa 4080 km<sup>2</sup>. Pro Hektar speichern Hecken etwa 231 t Kohlenstoff, was vergleichbar mit der Speicherleistung von Wald ist. Daraus ergibt sich eine gesamte, einmalige Kohlenstoffspeicherleistung von 94 Mio. t C. Würde man alle Hecken entfernen und die Fläche ackerbaulich nutzen, wären auf der gleichen Fläche insgesamt 56 Mio. t C weniger gebunden.

Bei einer Ausschöpfung des ermittelten maximalen Potenzials für neue Hecken könnten in Abhängigkeit der Heckenbreite von 10 ( $\pm 2$ ) m einmalig 229 ( $\pm 46$ ) Mio. t C, bzw. bei einer Pflanzung nur in den ermittelten Priorisierungsgebieten 45 ( $\pm 9$ ) Mio. t C gespeichert werden. Das entspricht 100 ( $\pm 20$ ) % (Maximalszenario) bzw. 20 ( $\pm 4$ ) % (Priorisierungsgebiete) des deutschen LULUCF-Senkenziels für 2030.

von Hecken ist zudem ihre richtige Pflege. Insbesondere dürfen sie weder zu wenig noch zu stark gepflegt werden, wobei die Intensität bzw. Häufigkeit stark vom Standort und der damit einhergehenden Wüchsigkeit abhängt. Zudem ist es wichtig, Hecken abschnittsweise bzw. nicht alle Hecken gleichzeitig zu pflegen, um zu jedem Zeitpunkt Ressourcen zu erhalten.

Weiterhin lässt sich auf Grundlage der bestehenden Literatur ein eindeutiger Bedarf an einem starken Zuwachs von Hecken ableiten. Dies wurde auf Grundlage eigener Erhebungen weiter untersucht.

Wachsen Hecken in der Agrarlandschaft, haben sie außerdem Einfluss auf das Mikroklima, den Wasserhaushalt, und je nach Abstand von der Hecke auf die Erträge auf den angrenzenden Ackerflächen. Trotz der im Rahmen des Projektes noch nicht vollständig abgeschlossenen Untersuchungen, können bereits einige Schlüsse gezogen werden: Bei eher feuchten Bedingungen konnten weder positive noch stark negative Effekte auf die Erträge nachgewiesen werden. In Feldrandlage wurde in wenigen Metern Abstand von den Hecken (ohne Saum) eine deutliche Ertragsminderung beobachtet. Dieser Effekt, der auch an Feldrändern ohne Hecke auftritt, kann nicht eindeutig auf die Hecken als Ursache zurückgeführt werden. In 12 m Entfernung von der Hecke konnte keine Ertragsminderung mehr beobachtet werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Etablierung eines Saums entlang der Hecke dazu beitragen kann, den Feldrandeffekt im Vergleich zu Hecken ohne Saum zu verringern. Auswertungen von Messergebnissen aus trockenen Perioden stehen noch aus. Ob Hecken durch Verringerung der Verdunstung dazu beitragen können, eventuelle Ertragsverluste auszugleichen, ist daher noch nicht belegt.

## Herausforderungen bei Heckenneuanlage und -pflege

Es gibt verschiedene Herausforderungen, die die großflächige Anlage von Heckenstrukturen und die Umsetzung von fachgerechter Pflege verhindern. Diese sind in den Rahmenbedingungen begründet, die eine Rolle bei der Entscheidung für oder gegen eine Hecke spielen (Abb. 2).

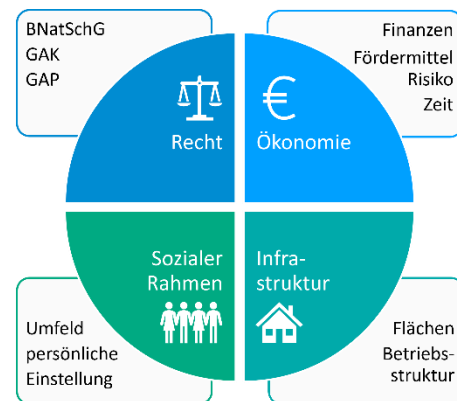


Abbildung 2: Rahmenbedingungen, die bei der Pflanzung von Hecken eine Rolle spielen, sowie Beispiele (eigene Darstellung).

Sowohl bei Pflanzung, Bewirtschaftung und Pflege als auch bei möglicher Beseitigung von Hecken sind rechtliche Regelungen im Ordnungs- und Förderrecht zu beachten, die sich hemmend auf die Neuanlage von Hecken auswirken können. Durch den gesetzlichen Schutzstatus der Hecken kann für Landwirt\*innen und Flächeneigentümer\*innen die Attraktivität von neuen Heckenpflanzungen sinken, weil nutzbare landwirtschaftliche Fläche auf Dauer aus der Produktion fällt. Zudem ist eine Nutzung von Hecken aufgrund der rechtlichen Lage stark eingeschränkt. Unattraktiver wird eine Heckenpflanzung ebenfalls durch Auflagen zur Pflanzung von gebietsheimischen Gehölzen, die zu Engpässen in der Verfügbarkeit sowie zusätzlichen Kosten führen können. Eigentumsverhältnisse können ein weiteres Hemmnis bei der Heckenneuanlage sein. Auch wenn der Wille für Heckenpflanzungen bei Landwirt\*innen vorhanden ist, sind die Möglichkeiten einer Heckenpflanzung z. B. bei Pachtflächen eingeschränkt. Der aktuelle Rechtsrahmen führt dazu, dass Flächeneigner\*innen eine Schlüsselrolle bei der Umsetzung von Heckenneuanlagen einnehmen. Dabei sind auch nicht-landwirtschaftliche natürliche Personen und Körperschaften mit zu berücksichtigen.

Aus betriebswirtschaftlicher Sicht ist das Anlegen von Feldhecken mit Beseitigungs- und Nutzungseinschränkungen vor allem in Bezug auf die alternativen Nutzungsmöglichkeiten (Opportunitätskosten) unattraktiv. Die (landwirtschaftliche) Nutzung der Fläche zur Einkommensgenerierung (ohne naturschutzfachliche Einschränkungen) bzw. die Flexibilität einer Maßnahme in Bezug auf die Dauerhaftigkeit der Flächenbelegung ohne Gefahr der Minderung des Verkehrswertes werden häufig als bessere Alternativen empfunden. Zudem wird das fehlende Wissen für die Umsetzung und Finanzierung bemängelt.

Die Kosten für eine Heckenneuanlage setzen sich aus verschiedenen Positionen zusammen: den Transaktionskosten für vorausgehende Abstimmungen zur Schaffung der Grundlage für eine Umsetzung, den Heckenplanungskosten, den Ausführungskosten (durch Dienstleistung oder in Eigenregie) z. B. in Form einer Boden- und/oder Pflanzvorbereitung, der Vermessung, den Pflanzungskosten, den Kosten für die Fertigstellungs- und die anschließende Etablierungspflege sowie den Direktkosten. Dazu gehören das Pflanz- oder ggf. das Mulchmaterial. Ein Schutz gegen Wildverbiss und Beschädigung durch Fegen für die bepflanzten Flächen in Form eines Zauns, aber auch als Einzelschutzmaßnahme kann zusätzlich einen großen Anteil

an den Anlagekosten ausmachen, wird jedoch häufig aufgrund des Risikos potenziell folgender Aufwendungen durch Wildschäden eingesetzt.

Die genannten Kosten werden von verschiedenen Faktoren beeinflusst, z. B. von den Material- und Bodeneigenschaften, der Witterung, den Verfügbarkeiten von Arbeitskraft, -geräten und Maschinenausstattung sowie der Lage der Fläche. So gibt es Standorte, bei denen 10x pro Jahr für die Etablierung bewässert wird und welche, bei denen keine Bewässerung notwendig ist.

Die Opportunitätskosten der Fläche durch die Landnutzungsänderung sind ebenfalls ein erheblicher Kostenpunkt. Weil Hecken, einmal gepflanzt, dort langfristig stehen, ergeben sich je nach Lage und Zustand der Fläche hohe Verluste durch Ertrags- und damit verbunden Einkommensverluste sowie mögliche Verkehrswertverluste. Diese Kosten sowie die Heckenanlagekosten über Leistungen aus der Verwendung von Heckenschnittmaterial zu decken, ist aufgrund der Preissituation und der derzeitigen Nachfrage sowie aufgrund der variablen bzw. geringeren Ertragsleistung durch rechtliche Einschränkungen kaum möglich. Bei der Nutzung und Ernte von dauerhaften Gehölzstrukturen gibt es naturschutzfachliche Einschränkungen. Beim sog. „Auf-den-Stock-setzen“ werden die Triebe der Feldhecken unweit des Wurzelstocks entfernt. Diese Verjüngungsmaßnahme sollte nur abschnittsweise und - je nach Wüchsigkeit - etwa alle 15 Jahre erfolgen. Erlöse durch Schnittmaterial sind daher nur von Teilstücken und erst langfristig zu erwarten. Zudem ist die Ertragserwartung mit höheren Risiken verbunden als bei den herkömmlichen Flächenbewirtschaftungsformen. Ggf. positive Wechselwirkungen auf die Erträge angrenzender Kulturen sind schwer quantifizierbar und wurden daher nicht mit einkalkuliert.

Die Kosten für eine Heckenpflanzung können (zum Teil) durch die Inanspruchnahme von Fördermaßnahmen kompensiert werden, die i. d. R. von den Ländern angeboten werden. Die Förderbeträge in vorhandenen Förderprogrammen reichen allerdings nicht in allen Fällen aus, die entstandenen Kosten zu decken. Außerdem gibt es Förderprogramme, die als unattraktiv empfunden werden, weil diese mit vielen Auflagen und komplizierter Antragsstellung verbunden sind. Im Projekt wurden deshalb Optionen entwickelt, wie die Pflanzung von Hecken attraktiver werden kann (s. Kasten „Handlungsempfehlungen“). Zusätzlich ist zu beachten, dass verschiedene Akteur\*innen unterschiedliche Ansprüche an und Vorteile von Gehölzpflanzungen haben. Daher könnte es sich lohnen, für Landwirt\*innen ein Förderprogramm zu entwickeln, in dem die Vorteile von Agroforstsystemen und Hecken kombiniert werden, inkl. möglicher Top-Ups für Biodiversität. Außerdem sollten in der Kommunikation insbesondere die Vorteile von Hecken für den Erosionsschutz herausgestellt werden. Gleichzeitig spielt die „klassische“ Hecke weiter eine wichtige Rolle für andere Akteur\*innen wie Gemeinden und Verbände, für die die über den Klimaschutz hinausgehenden Vorteile der Biodiversität, des Landschaftsbildes und der Klimaanpassung eine wichtige Rolle einnehmen.

### Optionen der Heckennutzung

Ursprünglich wurden Hecken aus verschiedenen Gründen angelegt (z. B. als Einfriedung, Schutz vor Winderosion, zur Holznutzung, Verwertung der essbaren Früchte). In der modernen Landnutzung sind diese Nutzungen kaum gefragt bzw. rechtlich stark eingeschränkt. Somit ergibt sich nur im Einzelfall die Möglichkeit für landwirtschaftliche Betriebe, einen Mehrwert aus Hecken zu erzielen. So bedarf z. B. die Nutzung von Hecken für Weidetiere als Futterhecken heutzutage meistens einer Genehmigung. Daher ist die Option, Neuanlagen von Hecken rechtlich als Agroforst anzulegen, bei denen eine Nutzung im Fokus steht, eine wichtige neue Lösung, um Hecken attraktiver zu gestalten. Auf den Versuchsflächen des Thünen-Instituts für Ökologischen Landbau wurden während der Projektlaufzeit von CatchHedge folgende Heckennutztypen angelegt, um aufzuzeigen, welche Nutzungsoptionen Hecken als Agroforstsystem bieten: Fruchthecke (Abb. 3), Floristhecke, Gerbstoffhecke sowie eine Biomassehecke und Hecken als Futter- und Schattenoption für Weidetiere. Zusätzlich wurden verschiedene Maßnahmen zum Schutz vor Wildtieren, zur Beikrautminimierung sowie zur Förderung der Biodiversität getestet.



Abbildung 3: Im Mai 2024 neu angelegte Hecke für die Nutzung von essbaren Früchten und Nüssen (Thünen-Institut / Kruse).

Aufgrund der für andere Nutzungen geltenden Einschränkungen kann für eine Verwertung vorrangig das Heckenschnittmaterial verwendet werden. In Regionen, in denen eine ausreichende Menge an Hecken bzw. Heckenschnittmaterial sowie Maschinen und Fachpersonal zur Verfügung steht, kann für größere Betriebe bzw. in Kooperation mit einer Anbieter- und Abnehmerstruktur eine effiziente Nutzung von Holzhackschnittzeln für die energetische Verwertung eine Alternative zu fossilen Energieträgern bieten.

### Standorte und Potenzial für neue Hecken

In CatchHedge wurde das Potenzial für neue Hecken in Deutschland ermittelt. Unter der Voraussetzung, dass neue Hecken an Schlagrändern angelegt werden und diese mind. 50 m Abstand zu bestehenden Hecken, Wäldern und untereinander aufweisen sowie nicht dort angelegt werden, wo es naturschutzfachliche Konflikte geben könnte, besteht



ein maximales Potenzial für neue Hecken von 989.000 km. Zudem wurden Priorisierungsregionen ermittelt, in denen die Heckenneuanlage besonders viele Vorteile in Bezug auf Biodiversität, Erosionsminderung und Landschaftsbild aufweist und in denen zugleich Opportunitätskosten für die Anlage möglichst gering sind. Das Ergebnis zeigt, dass Priorisierungsregionen in jedem Bundesland liegen, aber die höchste Priorität für zusätzliche Hecken vor allem in ostdeutschen Bundesländern liegt (Abb. 4).

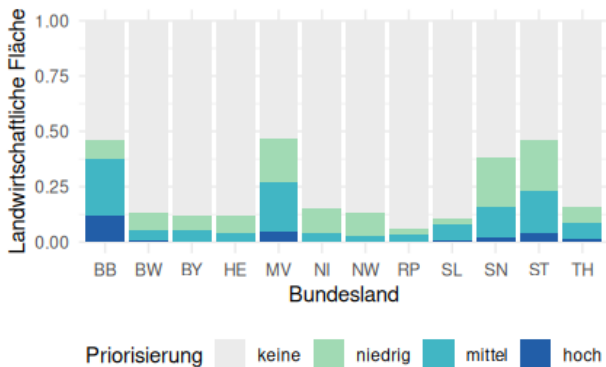


Abbildung 4: Anteil der ermittelten Priorisierungsgebiete an der landwirtschaftlichen Fläche nach Bundesland (eigene Darstellung)

In Bezug auf die Standortwahl spielt auch die Frage der größtmöglichen Förderung der Biodiversität eine Rolle. Hecken wird eine große Rolle in der Vernetzung von Biotopen zugeschrieben. Dies wurde mit Hilfe einer Konnektivitätsmodellierung vertieft analysiert.

### SCHLUSSFOLGERUNGEN

Neue Hecken sollten sowohl aus Klimaschutz- als auch Biodiversitätsgründen angepflanzt werden. Wichtige Voraussetzung ist, dass langfristig attraktive Förderprogramme für Pflanzung und Pflege angeboten werden. Die rechtlichen Rahmenbedingungen sollten vereinfacht werden, vor allem hinsichtlich Beseitigung und Nutzung, ohne dass sich der Bestand an Hecken verringert.

Um die Biodiversität zu fördern, ist außerdem die Etablierung eines Saums relevant. Vorteilhaft ist auch, dass er die Pflege der Hecke erleichtert, indem er ermöglicht, auch mit Maschinen an der Hecke zu arbeiten, ohne die angrenzende Fläche zu beschädigen. Darüber hinaus können durch das Vorhandensein eines Saums ggf. geltende

Abstandsregelungen eingehalten werden, ohne zusätzliche Fläche zu verlieren. Die Anlage eines Saums sollte ebenso wie die Pflanzung der Heckengehölze in den Fördermaßnahmen finanziell abgebildet werden.

Längerfristige Untersuchungen sind nötig, um eine Aussage darüber treffen zu können, ob Hecken dazu beitragen können, zukünftige Ertragsverluste durch die veränderten klimatischen Bedingungen abzufangen. Zudem könnten zukünftige Erkenntnisse über die Effekte von Hecken auf Bestäubung und Schädlingsbekämpfung für die Landwirtschaft genutzt werden. Zusätzliches Wissen darüber, wie Hecken am besten in Landschaften integriert werden können, um einen positiven Gesamteffekt auf die Biodiversität zu erzielen, würde dazu beitragen, Hecken möglichst effektiv anzulegen. Weiterführende Untersuchungen zur Festigung oder Etablierung von Wertschöpfungsketten könnten genutzt werden, um Hecken wirtschaftlich attraktiver zu machen. Zusätzlich sollte die Rolle unterschiedlicher Flächeneigentümer\*innen und nicht-staatlich geförderter Maßnahmen für Heckenpflanzungen enger beleuchtet werden.

### AUSGEWÄHLTE VERÖFFENTLICHUNGEN

- Schütze et al. (2025): Analyse des rechtlichen Rahmens und von Förderprogrammen für die Neuanlage von Hecken. Thünen Working Paper 249.
- Schütze et al. (2025): Hecken als Kohlenstoffsенke und Lebensraum in der Agrarlandschaft fördern - Umsetzung erleichtern. In: Berichte über Landwirtschaft (in Review).
- „Praxiswissen Hecken“: Kurzveröffentlichungen von Projektergebnissen.

### Weitere Informationen:

<https://www.thuenen.de/de/institutsuebergreifende-projekte/catchhedge-kohlenstoffspeicherung-in-hecken-und-feldgehoeelzen>



### HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN FÜR POLITIK UND PRAXIS

In CatchHedge wurden zahlreiche Stellschrauben identifiziert und Lösungsoptionen entwickelt, um die Pflanzung von Hecken für Landwirt\*innen und andere Flächeneigentümer\*innen attraktiver zu machen. Diese lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Attraktivere Förderprogramme schaffen: Abdeckung der Kosten, die mit der Heckenpflanzung und Heckenpflege verbunden sind (inklusive Opportunitätskosten)
- Unkomplizierte Förderprogramme schaffen: Standardisierung von Förderprogrammen für einfachere Antragsstellung und Bearbeitung, z. B. durch Festfördersätze oder Förderung nach Gebietskulissen, sowie flexible Förderbedingungen (z. B. hinsichtlich Heckenbreite)
- Unterstützung und Wissenstransfer schaffen: Umsetzung von Pflanzung und Pflege durch Etablierung von "Kümmererstrukturen" erleichtern (z. B. im Rahmen von Beratung, Kooperativen oder mit dem Angebot einer „schlüsselfertigen Hecke“)
- Sicherheit schaffen: Vereinheitlichung des Rechtsrahmens hinsichtlich der Unterschutzstellung und Pflege; Planungssicherheit insbesondere für Pflege und Laufzeit von Förderprogrammen
- Regelungen vereinfachen: einheitliche Regelungen und Förderung für Gehölze auf Agrarflächen schaffen sowie Regelungen für gebietsheimische Gehölze vereinfachen.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Landwirtschaft, Ernährung  
und Heimat

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

### Erschließung von Klimaschutzpotentialen durch verbesserte Fruchtfolgegestaltung – Potentialanalyse und Entwicklung eines Entscheidungsunterstützungssystems

Ahmed Attia, Carsten Marohn, Patryk Fussek, Arno de Kock, Franz Bauer, Shanmugapriya Selvaraj, Philip Lemke, Jörn Strassemeier, Heike Gerighausen und Til Feike

#### ZIELSETZUNG

Der Ackerbau leidet zunehmend unter den Folgen des Klimawandels. Gleichzeitig trägt er insbesondere durch die Emission von Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ) zum Klimawandel bei. Auf der anderen Seite sind landwirtschaftlich genutzte Böden potenzielle  $\text{CO}_2$ -Senken, die dem Klimawandel entgegenwirken können. Eine Verbesserung von Fruchtfolgen im Hinblick auf deren THG-Emissionen (insbesondere  $\text{N}_2\text{O}$ ) und Bodenkohlenstoff (SOC)-sequestrierung bzw. -verlustvermeidung wird als vielversprechende Klimaschutzmaßnahme im Ackerbau gesehen.

Ein wichtiges Projektziel von KlimaFFolgen war daher die Umsetzung einer deutschlandweiten Potenzialanalyse verbesserter Fruchtfolgen zur THG-Minderung und Kohlenstoffsequestrierung in landwirtschaftlichen Böden. Auf Grundlage vorhandener Boden- und Wetterdaten, prozessbasierter Boden- und Pflanzenmodellierung sowie gekoppelter Ökobilanzierung (LCA) sollte ein schlagspezifisches Entscheidungsunterstützungssystem (EUS) zur Fruchtfolgegestaltung entwickelt und der landwirtschaftlichen Praxis bereitgestellt werden. Neben der Analyse einzelner Felder sollte dieses auch serverbasierte Massennläufe des Modells zur Politikberatung auf regionaler Ebene ermöglichen.

Während Datensätze zur Fruchtartenverteilung und Fruchtfolgen der Hauptfrüchte in Deutschland bereits vorliegen, ist die Information zu Zwischenfrüchten und Ernterückständen sehr begrenzt. Daher sollten mit Hilfe von Satellitendaten hochaufgelöste Informationen zu Zwischenfruchtanbau und Ernterückständen in der landwirtschaftlichen Praxis gewonnen werden. Diese können mittelfristig als Input in einen digitalen Zwilling dienen, der die tatsächliche Fruchtfolgesituation und entsprechende Optimierungspotenziale im Hinblick auf den Klimaschutz abbildet.

#### METHODIK

##### Simulation des Boden-Pflanze-Atmosphäre-Systems

Für die Simulationen wurde das prozessbasierte Boden-Pflanzen-Modell DSSAT v4.8.2 mit dem integrierten DayCENT-Modell für organische Bodensubstanz verwendet. Umfangreiche Felddaten zur Kalibrierung und Validierung des Modells wurden den Studien von [Weber et al. \(2022\)](#) und [Mallast et al. \(2021\)](#) entnommen. Mittels einer Kombination aus globaler Sensitivitätsanalyse (EFAST) und *multi objective* Kalibrierung (NSGA II Algorithmus) wurde eine ausgewogene Optimierung des Modells für Erträge, Bodenfeuchte,  $\text{CO}_2$ - und  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen für mehrere Standorte, die unterschiedliche  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionsmengen repräsentieren, durchgeführt (Abb. 2). Durch parallelisierte Simulationen auf JKI-Servern wurden multiple Modellläufe zur vergleichenden Bewertung unterschiedlicher Fruchtfolgen (Abb. 1) für größere Regionen (Abb. 3) sowie deutschlandweit bis zum Ende des Jahrhunderts (Abb. 4) umgesetzt.

#### HIGHLIGHTS

- Das DSSAT Modell wurde zur Abbildung der Bodenkohlenstoffentwicklung und  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen in Fruchtfolgen erfolgreich getestet
- Deutschlandweite Simulationen zeigen substantielle Klimaschutzpotenziale durch geeignete Fruchtfolgen, insbesondere durch vermehrten Zwischenfruchtanbau
- Die satellitenbasierte Erfassung von Winterzwischenfrüchten wurde erfolgreich erprobt
- Der Prototyp des Entscheidungsunterstützungssystems wurde erstellt und getestet

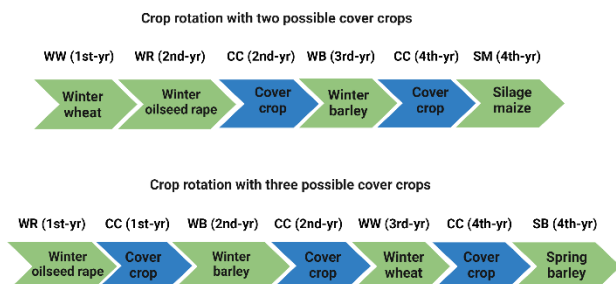


Abbildung 1: Übersicht über simulierte Fruchtfolgen mit unterschiedlicher Intensität von Zwischenfrüchten.

#### Detektion von Zwischenfrüchten aus Satellitendaten

Um Zwischenfrüchte zu detektieren wurden mehrjährige Sentinel-1-SAR- und Sentinel-2-optische Zeitreihen (2021-2024) mithilfe eines hierarchischen Random Forest-basierten Klassifikationsansatzes analysiert (Abb. 5). Zur Bewertung der räumlich-zeitlichen Übertragbarkeit, wurden die Modelle in verschiedenen Regionen und Jahren anhand räumlich unabhängiger Testproben trainiert und anhand etablierter Fehlermetriken validiert. Zur Ermittlung von Ernterückständen wurden Daten aus der LUCAS-Erhebung und Sentinel-2-basierte Bodenbearbeitungsindizes verwendet.

#### Entwicklung des Entscheidungsunterstützungssystems (EUS)

Das EUS wurde in Javascript und Python programmiert und an die bestehende SYNOPSIS Plattform des Julius Kühn-Instituts angedockt. Die graphische Benutzeroberfläche zur Dateneingabe, prozessbasierte Modellierung, Ökobilanzierung (LCA) und die Visualisierung der Modellergebnisse wurden dabei im EUS zusammengeführt. Die LCA wurde dabei von der Wiege bis zum Hof (cradle-to-farm gate) durchgeführt, basierend auf den modellierten THG-Emission und Erträgen. Dadurch können Aussagen zum  $\text{CO}_2$ -

## KLIMAWIRKUNG

Die gewonnenen Erkenntnisse zu verbesserten Fruchtfolgen und das entwickelte KlimaFFolgen EUS können bessere Fruchtfolgeentscheidungen für mehr Klimaschutz in der landwirtschaftlichen Praxis unterstützen. Verbesserte Fruchtfolgen können helfen  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen zu reduzieren und die Kohlenstoffsequestrierung bzw. -verlustvermeidung zu verbessern. Die deutschlandweiten Simulationen für das 21. Jahrhundert zeigen, dass die  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen nur in sehr begrenztem Maße durch die Fruchtfolgegestaltung reduziert werden können. Jedoch zeigen verbesserte Fruchtfolgen mit vermehrten Zwischenfruchtanbau substantielle zusätzliche Kohlenstoffspeicherungspotenziale von mehreren Tonnen pro Hektar. Die Effekte stellen sich jedoch nur mittel- bis langfristig ein und es kommt zu einer Sättigung im Speicherungspotenzial. Unter dem RCP8.5 (warme Zukunft) kommt es sogar zu einem Abbau von SOC trotz verbessertem Management zum Ende des Jahrhunderts.

Fußabdruck auf Tier 3-Niveau getroffen werden, d. h. unter Berücksichtigung der lokalen Bodenbedingungen und des saisonalen Witterungsverlaufs und spezifischen ackerbaulichen Managements. Weiterentwicklungen im EUS werden dokumentiert und dem bestehenden SYNOPSIS zugänglich gemacht.

## ERGEBNISSE

### Regionale und deutschlandweite Fruchtfolgesimulationen

Die Kalibrierung von DSSAT anhand der Messdaten von [Weber et al. \(2022\)](#) und [Mallast et al. \(2021\)](#) ergab in beiden Studien eine gute Abbildung der Erträge. Die Übereinstimmung simulierter und gemessener THG-Emissionen variierte nach Standort ([Abb. 2](#)).

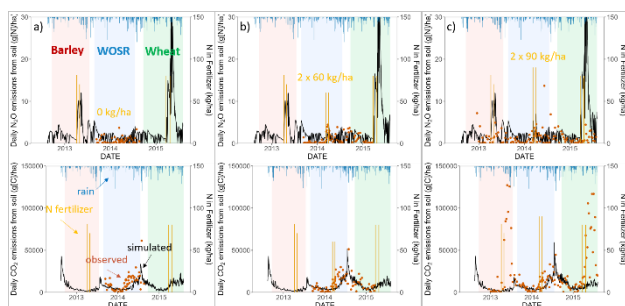


Abbildung 2: Validierung der simulierten THG-Emissionen des DSSAT-Modells gegen Messdaten eines Feldversuchs bei unterschiedlichen Düngungsstufen (Marohn et al. (under review))

Für die Region Kraichgau und Schwäbische Alb in Baden-Württemberg zeigten vergleichende Szenarien unterschiedlicher Fruchtfolgen für den Zeitraum 2006-2020 Potenziale zu vermehrtem Aufbau organischer Bodensubstanz durch vermehrte Integration von Zwischenfrüchten, besonders von Leguminosen, in die Fruchtfolge ([Abb. 3](#)). Auch Auswirkungen der verbesserten Fruchtfolgen auf Erträge, Bodenstickstoffgehalt und Stickstoffauswaschung an den unterschiedlichen Standorten wurden dabei betrachtet. So zeigten sich in einzelnen Teilregionen Zielkonflikte aus steigendem Bodenkohlenstoffgehalt bei

gleichzeitig steigendem N-Auswaschungsrisiko ([Attia et al. 2024](#)).

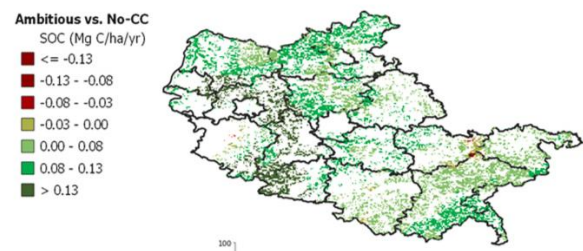


Abbildung 3: Simulierte Unterschiede in der Entwicklung des Bodenkohlenstoffs (SOC) im Vergleich einer Fruchtfolge mit („ambitious“) vs. ohne („no-CC“) Zwischenfrüchte für Kraichgau und Schwäbische Alb (2006-2020) ([Attia et al., 2024](#)).

Unter Nutzung der projizierten Wetterdaten des [DWD-Kernensembles](#) wurden repräsentative Fruchtfolgen vergleichend bis zum Ende des Jahrhunderts (für RCP4.5 und RCP8.5) simuliert und hinsichtlich der  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen und SOC-Entwicklung bewertet. Hierbei zeigten sich starke regionale Unterschiede, mit den geringsten SOC-Steigerungspotenzialen in der Ackerbaugroßregion Nord und den höchsten in der Region Süd. SOC-Sequestrierung durch verbesserte Fruchtfolgen konnte dabei einen substantiellen Beitrag zur Reduktion der Netto-THG-Emissionen leisten, wobei sich eine Sättigung einstellt und die Böden unter RCP8.5 zum Ende des Jahrhunderts wieder zu einer Kohlenstoffquelle werden ([Abb. 4](#)).

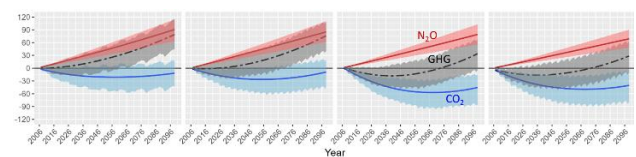


Abbildung 4: Entwicklung der kumulativen netto- $\text{CO}_2$  und  $\text{N}_2\text{O}$  Emissionen ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) in Deutschland in 2006-2099 in business-as-usual (BAU), verbesserter Fruchtfolge ohne (N0-L0), mit einer Leguminose und einer Nichtleguminose (N1-L1) und drei Leguminosen-Zwischenfruchtgliedern (N0-L3) unter RCP8.5 ([Attia et al. \(under review\)](#)).

### Klassifikation von Zwischenfrüchten mittels Fernerkundung

Die satellitenbasierte Klassifikation von Zwischenfrüchten unter Verwendung von SAR-, optischen und fusionierten Datenzeitreihen zeigte, dass kombinierte SAR-optische Merkmale das beste Ergebnis erbringen ([Selvaraj et al. \(under review\)](#)). Die Unterscheidung von Hauptanbaukulturen und Zwischenfrüchten war mit einer Gesamtgenauigkeit von 90 % möglich und zeigte eine starke zeitliche (86 %) und räumliche (77 %) Übertragbarkeit. Die Kartierung einzelner Zwischenfrüchte (Level-2) ist ebenso möglich, wenn auch mit etwas geringerer Klassifikationsgenauigkeit. Die Ergebnisse unterstreichen den komplementären Wert von SAR- und optischen Daten für die operationelle, übertragbare satellitenbasierte Kartierung von Winterzwischenfrüchten in Deutschland.



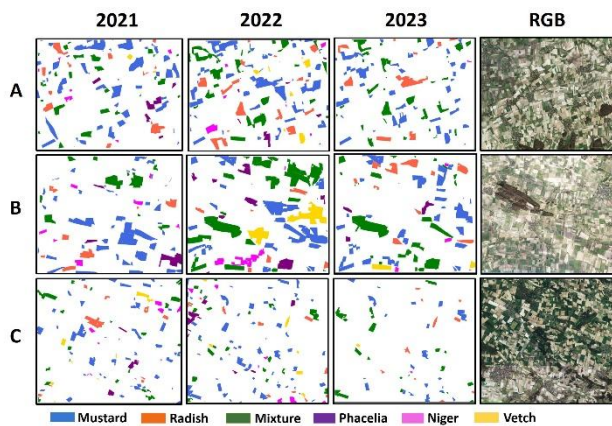


Abbildung 5: Satellitenbasierte Klassifikation von Zwischenfrüchten für die Jahre 2021, 2022 und 2023 in drei ausgewählten Testregionen im Umkreis von Braunschweig (Niedersachsen) und hochauflösende digitale Orthophotos  
© GeoBasis-DE / BKG 2025 (Selvaraj et al., 2025).

### Prototyp des Entscheidungsunterstützungssystems (EUS)

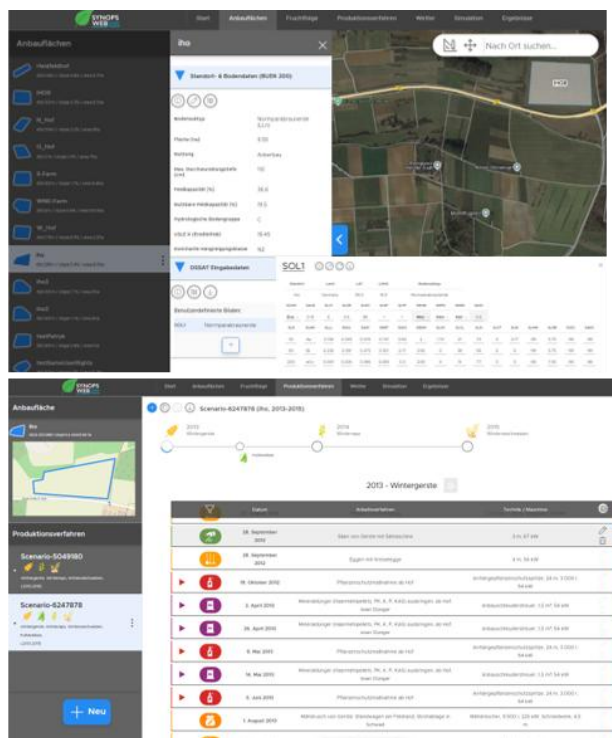


Abbildung 6: Flächenauswahl und Ableitung von Bodenparametern aus der BUEK 200 im KlimaFFolgen-EUS, einer Weiterentwicklung des bestehenden SYNOPSIS (oben); Liste von Arbeitsgängen nach erfolgter Wahl der Fruchtfolge (unten)

Die Programmierung des EUS basiert auf der bestehenden SYNOPSIS-Plattform des Julius Kühn-Instituts. Dabei wurde die zugrundeliegende Datenbasis an die aktuelle Bodenübersichtskarte BUEK 200 angepasst und deren Daten für

das DSSAT Modell kompatibel gemacht (Abb. 4 oben), Wetterdaten des DWD wurden auf den Radolan-Datensatz für Niederschläge umgestellt. Auswahlmenüs für Fruchtfolgen und Arbeitsgänge wurden entwickelt (Abb. 5) auf deren Basis das DSSAT-Modell läuft. Simulierte Emissionen, SOC-Entwicklung und Erträge aus DSSAT komplettieren die Emissionsberechnungen der LCA, in die außerdem Daten zu Pestiziden, Düngemitteln und Dieselverbrauch einfließen. Unter Nutzung von Getreideeinheiten nach Brankatschk & Finkbeiner (2014) können die LCA-Ergebnisse auf Ebene der Fruchtfolge und der einzelnen Kulturen ausgegeben werden. Verschiedene Szenarien können somit simuliert und hinsichtlich von Erträgen, Humus-, Nährstoff- und Wasserbilanzen im Boden sowie Emissionen verglichen werden.

### SCHLUSSFOLGERUNGEN

Das in KlimaFFolgen für die Simulation ausgewählter Fruchtfolgen umfänglich für Erträge,  $N_2O$ -Emissionen und SOC-Entwicklung kalibrierte und validierte DSSAT Modell bildet den Kern des entwickelten Prototyps des KlimaFFolgen-EUS zur Beratung hinsichtlich klimafreundlicher Fruchtfolgen. Durch Integration mit Ökobilanzierung (LCA) ermöglicht das EUS eine ganzheitliche Exploration von Erträgen, Ressourceneffizienz und Umweltwirkung verschiedener Fruchtfolgen auf Schlagebene deutschlandweit. Die regionale und deutschlandweite Simulation ausgewählter Fruchtfolgen zeigt nur ein begrenztes Potenzial,  $N_2O$ -Emissionen zu reduzieren, während sich substantielle SOC-Steigerungspotenziale mit starken regionalen Unterschieden zeigen. Standortoptimierte Fruchtfolgen mit intensiverem Zwischenfruchtanbau bieten großes Klimaschutzpotenzial, das sich jedoch nicht kurzfristig erschließen lässt. Die erfolgreiche satellitenbasierte Detektion und Klassifikation von Zwischenfrüchten schließt eine wichtige Datenlücke, um die entwickelten Ansätze inklusive des EUS mittelfristig als einen digitalen Zwilling weiterzuentwickeln.

### AUSGEWÄHLTE VERÖFFENTLICHUNGEN

- Attia, A, Marohn, C, Shawon, AR, Kock, A de, Strassemeyer, J, Feike, T (2024): Do rotations with cover crops increase yield and soil organic carbon? — a modeling study in southwest Germany. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 375, 109167. <https://dx.doi.org/10.1002/agj2.21590>
- Selvaraj, S, Bargiel, D, Htitiou, A, Gerighausen, H (2025): A SAR-Driven Approach for Winter Catch Crop Classification in Germany. *IEEE Access*, vol. 13, 171642-171665. <https://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3615739>
- Attia, A, Woli, P, Long, CR, Rouquette, FM, Smith, GR, Datta, A, Feike, T, Rajan, N (2025): Unlocking climate resilience by exploring the mitigation potential of improved rotation with cover cropping. *Journal of Environmental Management*. 391, 126352. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.126352>

### Handlungsempfehlungen für Politik und Praxis

Die regionalen Simulationen mit dem validierten DSSAT Modell zeigten substantielle SOC-Steigerungspotenziale durch vermehrten Zwischenfruchtanbau in Deutschland. Da sich die Effekte jedoch nur sehr langsam einstellen und die Integration von Zwischenfrüchten zusätzlichen Aufwand bedeutet, sind zusätzliche Anreize erforderlich. Zudem zeigt sich eine Sättigung des Kohlenstoffsteigerungspotenzials und sogar eine Abnahme des Bodenkohlenstoffs zum Ende des Jahrhunderts unter RCP8.5 (warme Zukunft), was bei der Entwicklung und Steuerung des  $CO_2$ -Zertifikate Handels berücksichtigt werden sollte. Das entwickelte EUS unterstützt nach Freischaltung die Praxis bei der Entwicklung und Umsetzung standort- und klimaoptimierter Fruchtfolgen.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



### Verbesserte Kohlenstoffspeicherung durch Anbau von mehrjährigem Getreide

Torsten Thünen, Samad Ashrafi, Doreen Gabriel, Lorenz Kottmann, Katrin Kuka, Burkhard Stever-Schoo, Yvonne Becker und Wolfgang Maier

#### ZIELSETZUNG

Ziel des Projektes war die Bewertung des Klimaschuttpotenzials perennierender (mehrjähriger) im Vergleich zu annuellen Getreideanbausystemen. Hierfür wurde ein Vergleich der beiden Anbausysteme und die Evaluation ihrer Vor- und Nachteile durchgeführt. Es wurden marginale Grenzertrags-Standorte betrachtet, auf welchen schon derzeit (und durch den Klimawandel in Zukunft noch verstärkt) ein Anbau einjähriger Getreide und anderer einjähriger Fruchtarten kaum lohnend ist.

Neben Ertrags- und Qualitätsbestimmungen sollte durch die Ermittlung des Kohlenstoffspeicherungspotenzials untersucht werden, in welchem Umfang perennierende Getreide-Anbausysteme einen Beitrag zum Klimaschutz leisten können. Das Boden-Mikrobiom leistet mit seinen diversen Funktionen einen entscheidenden Beitrag zur Bodenfruchtbarkeit und damit auch zur Kohlenstoffspeicherung.

In dem Projekt sollten zudem synergistische Effekte eines Mischanbaus mit Leguminosen untersucht werden. Ein Fokus lag hier auf der Stickstoff-Versorgung beider Mischungspartner.

Mit Blick auf die zukünftig notwendigen Verbesserungen bei der Stickstoffeffizienz, vor allem im Getreideanbau, sollten die Auswirkung des perennierenden Anbaus im Vergleich zu klassischerweise engen Weizen- bzw. Wintergetreidefruchtfolgen auf die Stickstoffdynamik und Nitratauswaschung betrachtet werden.

Perennierende Kulturen können allerdings auch einige Nachteile gegenüber annuellen Anbausystemen aufweisen, die sich direkt aus den längeren, mehrjährigen Standzeiten der Kulturen ohne potenziell jährliche Kulturfolgen ergeben. So kann ein mit den Jahren zunehmender Erregerdruck durch Anreicherung von Pathogenen am Standort das Ertragspotenzial eines solchen System limitieren. Da es bisher kaum Informationen für perennierende Getreide-Anbausysteme gibt, wurden hierzu ebenfalls erste Erhebungen durchgeführt.

#### METHODIK

In einem ersten Versuch wurde das Ertragspotenzial von P-Weizen (Kreuzung aus Weizen und *Thinopyrum intermedium*) anhand eines Stickstoffsteigerung-Versuches ermittelt. Ein besonderes Augenmerk wurde hier auf die unterirdische Biomasse-Entwicklung und damit auf das Kohlenstoffspeichungs-Potenzial gelegt. Hierfür wurden vier verschiedenen Düngestufen von 30, 60, 90 und 120 kg, sowie eine Nullvariante in fünffacher Wiederholung an den beiden Standorten Braunschweig-Bundesallee und Sickte untersucht. Die 30 kg und 60 kg Varianten bekamen sie als eine Gabe. Eine 90 kg, 120 kg sowie eine nachträglich hinzugenommene 180 kg Variante wurden jeweils mit drei gleichen Gaben gedüngt. Der P-Weizen wurde mit einer

#### HIGHLIGHTS

- Isolation und Bestimmung möglicher Symbiose-Partner für Esparsette und Kernza® für eine optimierte Nährstoffversorgung der Pflanzen
- Visualisierung der Knöllchen-Bildung mittels 3D-Computertomographie für ein zerstörungsfreies Monitoring der Knöllchenbildung
- Art-Diagnose der Kernza® Pathogene für einen gezielteren Pflanzenschutz
- Kernza® Saatgutvermehrung für Folgeprojekte

dreigliedrigen annuellen Fruchtfolge aus Winterweizen (cv. Talent), Wintergerste (cv. Higgins) und Winterraps (cv. Amboss) verglichen. Die Anlage des Versuches erfolgte im September und Oktober 2023.

In einem zweiten Versuch wurde der Einfluss eines Mischanbaus von P-Weizen bzw. Kernza® (*Thinopyrum intermedium*) mit Esparsette (*Onobrychis viciifolia*) auf die Bestandsentwicklung sowie synergistische Effekte untersucht. Dieser Versuch wurde in dreifacher Wiederholung am Standort Braunschweig-Bundesallee angelegt. Aussaat erfolgte im September 2023. Um für weitere Versuche genügend Saatgut zur Verfügung zu haben, wurde zudem Vermehrungs-Parzellen für P-Weizen und Kernza® (Aussaat September 2023) angelegt.

Jeweils im September wurden von alle Parzellen Bodenproben aus den Tiefen 0 - 30 cm, 30 - 60 cm sowie 60 - 90 cm genommen. Von diesen Proben wurden N-min und die pilzliche Biomasse bestimmt.

Erhebungen zu den Krankheiten des angebauten P-Weizens bzw. von Kernza® wurden durch Begehungen der Versuchsfelder und Bonitur der Symptome durchgeführt. Die Verursacher der Krankheiten wurden anschließend mittels lichtmikroskopischer und molekularphylogenetischer Methoden bis zur Art bestimmt. Für die DNA-Sequenzbasierte Identifikation wurden im Falle der Rostpilz-Symptome die ITS2-Region und ein Teil der angrenzenden LSU rDNA analysiert. Im Falle des Echten Mehltaus wurde die ganze ITS-Region (ITS1, 5.8S rDNA und ITS2) analysiert.

#### ERGEBNISSE

##### N-Steigerungsversuch

Kontinuierliche N-min Beprobungen während der gesamten Vegetationsperiode zeigten, dass der P-Weizen in der 60 kg Variante diese Gabe komplett aufgenommen hatte. Daher wurde diese nachträglich in eine 180 kg Variante geändert mit jeweils weiteren 60 kg zur zweiten und dritten Gabe.

Nach der Ernte wurden die Parzellen mehrmals bonitiert, um den Neuaustrieb des P-Weizen zu dokumentieren. Hierbei konnte jedoch kein Neuaustrieb an bestehenden

## KLIMAWIRKUNG

Durch eine tiefe, intensive und dauerhafte Durchwurzelung haben perennierende Kulturen das Potenzial vermehrt Kohlenstoff im Boden zu speichern. Der dauerhafte Charakter erlaubt den Aufbau eines weitverzweigten Netzwerks an Mykorrhiza-Pilzen, wodurch weitere Kohlenstoffeinträge in den Boden ermöglicht werden.

Neben dieser aktiven Kohlenstoff-Speicherung kommt es durch den verringerten maschinellen Arbeitsaufwand zu einer Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Pflanzenstöcken beobachtet werden. Sämtlich neu aufwachsenden P-Weizen Pflanzen waren aus zuvor ausgefallenem Saatgut gekeimt. Da kein perennierender Charakter des zur Verfügung stehenden Saatguts erkennbar war, wurde der Versuch beendet.

## Saatgutvermehrung

Von der Kernza®-Vermehrungsfläche konnten im ersten Jahr ca. 8 kg Saatgut gewonnen werden. Dieses wurde genutzt, um eine weitere, größere Vermehrungsfläche zu etablieren.

## Wurzelentwicklung

Exemplarisch wurden eine annuelle Weizenparzelle und die zweijährige Kernza® Vermehrungsfläche mittels Rammkernsondierung beprobt. Die visuelle Kontrolle der beiden Proben zeigt eine deutlich intensivere und tiefere Durchwurzelung bei Kernza® im Vergleich zu annuellem Weizen (Abb. 3).

## Mischanbau

Im Mischanbau wurde bei der ausgesäten Esparsette festgestellt, dass einige Pflanzen aufgrund ihres Habitus eine gute Stickstoffversorgung vermuten ließen, während andere Anzeichen von Stickstoffmangel zeigten (Abb. 1).



Abbildung 1: Esparsette mit Unterschieden in Wachstum und Farbe. Die Pflanzen wiesen Unterschiede bei der Nodulation mit Rhizobien auf. Quelle: Eigene Aufnahme.

Für weitere Untersuchungen mittels Mikro-Röntgen-computertomographie wurde jeweils eine Pflanze aus beiden Gruppen entnommen. Die erzeugten Bildaufnahmen zeigten bei den gut versorgten Pflanzen eine ausgeprägte Wurzelknöllchenbildung durch Rhizobien (Abb. 2), während die Pflanzen mit Stickstoffmangel kaum Wurzelknöllchen bildeten.

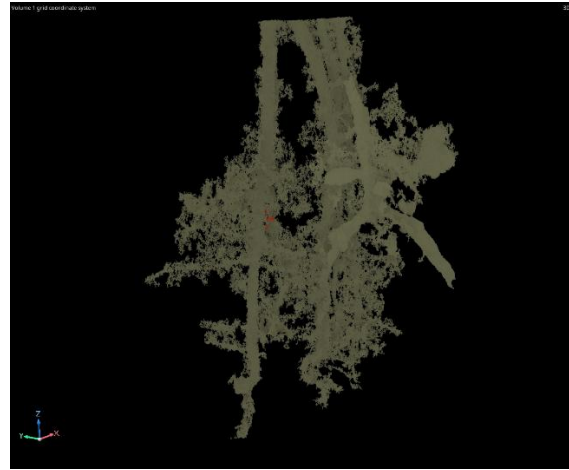


Abbildung 2: 3D-µCT-Bilder eines Teils der Wurzeln einer dunkelgrünen Esparsettenpflanze und entsprechendes 2D-µCT-Bild. Die Pfeile zeigen die gebildeten Knöllchen. Bei hellgrünen Pflanzen konnten keine Knöllchenbildung beobachtet werden. Quelle: eigene Aufnahmen

Aus Oberflächen-sterilisierten Knöllchen der Esparsette wurden Bakterien, aus Oberflächen-sterilisierten Wurzeln Bakterien und Pilze isoliert. Aus Wurzeln konnten 23 Isolate an Bakterien und 11 Isolate an Pilzen gewonnen werden. Die 11 Pilze stammen aus 10 verschiedenen Gattungen.

Zusätzlich wurden die annuellen Parzellen aus dem Stickstoff-Steigerungsversuchs beprobt. Von diesen Proben wird die Pilz-Biomasse bestimmt.



Abbildung 3: Mit einem benzinbetriebenen Schlagbohrsystem entnommene Bodenkerne von A. einjährigem Weizen und von B. Kernza® im Jahr Zwei nach Aussaat. Quelle: eigene Aufnahmen

### Pathogensituation bei P-Weizen und Kernza®

Bei der Feldbegehung im August 2023 wurde ein sehr starker Befall des P-Weizens durch obligat parasitische Rost- bzw. Mehltaupilze festgestellt. Dies führte letztlich zu einem Zusammenbruch der Vermehrungsfläche. Die anschließenden lichtmikroskopischen und DNA-basierten Untersuchungen ergaben, dass es sich bei dem Verursacher der Rostkrankheit um *Puccinia triticina*, den Weizenbraunrost, handelte, bei dem Verursacher der Mehltaukrankheit um *Blumeria graminis*, den Echten Mehltau des Weizens.

Im Projektjahr 2024 wurden zwei Erhebungen der vorhandenen Pilzpathogene auf den Versuchspartzen mit P-Weizen und Kernza® durchgeführt – am 16.05.2024 und am 13.06.2024. Trotz regelmäßiger Fungizidbehandlungen, konnte in den P-Weizenfeldern wieder verbreitet Rost- und auch Mehltaubefall festgestellt werden. In den benachbarten Versuchspartzen mit Kernza® konnten wir keinen Rost- und nur vereinzelt Mehltaubefall feststellen. Die Identifikation verschiedener Stichproben der Verursacher der Krankheitssymptome mittels Lichtmikroskopie und molekularphylogenetischer Analyse ergab, dass auch 2024 *Puccinia triticina* und *Blumeria graminis* die Hauptverursacher der Krankheiten waren. (Abb. 4).

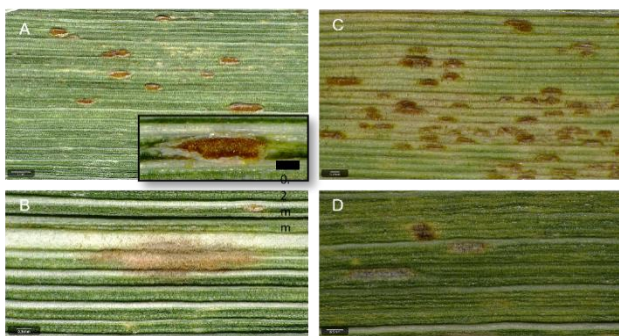


Abbildung 4: A Braunrost auf Weizen. B. Mehltau auf Weizen. C. Braunrost auf P-Weizen. D. Schwacher Mehltaubefall auf Kernza®. Quelle: eigene Aufnahmen

### SCHLUSSFOLGERUNGEN

In diesem Projekt ging es darum, erste Erfahrungen mit perennierenden Getreide-Anbausystemen zu gewinnen. Da von Kernza® Saatgut nur sehr geringe Mengen zur Verfügung standen, wurde hiervon zunächst nur eine Vermehrungsfläche für die Saatgut Produktion angelegt. Lediglich im Mischanbau wurde die Eignung von Kernza® mit Esparsette untersucht. Für den Hauptversuch wurde auf P-Weizen Saatgut, einer Kreuzung aus Winterweizen und *Thinopyrum intermedium*, zurückgegriffen. Leider stellte sich hier im Laufe des Versuches heraus, dass dieses Saatgut keinen perennierenden Charakter besitzt.

Im Mischanbau konnte gezeigt werden, dass ein gleichzeitiger Anbau von Kernza® und Esparsette funktioniert, die Esparsette in dem gewählten Mischungsverhältnis durch die Konkurrenz zum Kernza® jedoch stark

zurückgedrängt wird. In der Mischung zeigte sich ein wesentlich geringerer Unkrautdruck als in Reinsaat-Parzellen von Esparsette. Mikrobielle Untersuchungen haben zudem gezeigt, dass in den Knöllchen der Esparsette häufig Symbiose-Partner zu finden waren, welche in früheren Untersuchungen gezeigt haben, dass sie den Stickstoffbedarf der Esparsette jedoch nicht decken können. Dies könnte ein weiterer Grund für den starken Rückgang am Esparsetten-Anteil in den Mischparzellen sein. Durch die Bereitstellung eines optimalen Symbiose-Partners kann die Versorgung verbessert werden.

Basierend auf Untersuchungen von Proben aus dem ersten Jahr wurde festgestellt, dass mit sehr wenigen Ausnahmen nur in der obersten Schicht (0 – 30 cm) Pilz-Biomasse vorhanden war. Erst nach der Analyse der beiden Folgejahre kann hier eine Aussage getroffen werden, ob es durch die tiefere und dauerhafte Durchwurzelung der tieferen Bodenschichten zu einer Erhöhung der Pilz-Biomasse kommt.

Die hohe Robustheit von *Thinopyrum intermedium* gegen zwei der wichtigsten Weizenkrankheiten (Rost und Echter Mehltau), die auf in jüngerer Zeit identifizierten Resistenzgenen beruht, zeigt sich auch bei Kernza® im Versuchsanbau. Trotz hohem Pathogendruck war Kernza® praktisch frei von diesen Krankheiten. Somit sollte ein Anbau von Kernza® auch ohne Fungizidbehandlung möglich sein.

### AUSGEWÄHLTE VERÖFFENTLICHUNGEN

Thünen T, Kuka, K, Lorenz M, Ashrafi, S: *Mesorhizobium onobrychidis*, Eine neue Hoffnung für die Esparsette. Klimaschutz und Klimawandelanpassung im Grünland: Tagungsband zur 66. Jahrestagung in Eberswalde vom 04. bis 06. September 2024, S. 105-108, [https://www.openagrar.de/receive/openagrar\\_mods\\_00101098](https://www.openagrar.de/receive/openagrar_mods_00101098)

#### Weitere Informationen:

<https://wissen.julius-kuehn.de/klimaschutz/projekte/erhoehung-kohlenstoffspeicherpotentiale/klimagetreide>

### HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN FÜR POLITIK UND PRAXIS

Zum jetzigen Zeitpunkt reichen die Ergebnisse aus diesem Projekt noch nicht für konkrete Handlungsempfehlungen aus.

Auf Grenzertragsstandorten könnte der Anbau von perennierendem, tiefwurzelndem Getreide in Zukunft eine Möglichkeit darstellen, vermehrt Kohlenstoff im Boden zu speichern.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Landwirtschaft, Ernährung  
und Heimat

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



## SORGHUM

01.10.2022-31.12.2025

### Sorghumanbau in Deutschland als aktiver Beitrag zum Klimaschutz

Andreas Stahl, Christiane Seiler, Gwendolin Wehner, Amir Hajjarpour, Til Feike, Christiane Balko, Amna Eltigani und Lorenz Kottmann

#### ZIELSETZUNG

Das Projekt SORGHUM (Vermehrte Humusreproduktion durch den Anbau von Sorghum in Deutschland als aktiver Beitrag zum Klimaschutz) zielt darauf ab, die C4-Pflanze Sorghum für den nachhaltigen Anbau in Deutschland zu etablieren. Sorghum kann durch hohe Trockenheits- und Hitzetoleranz, gute Humusbildung und hohe Ressourceneffizienz wesentlich zum Klimaschutz beitragen – auch durch eine erhöhte Kohlenstoffspeicherung im Boden. Damit Sorghum unter mitteleuropäischen Bedingungen erfolgreich angebaut werden kann, wurden im Projekt in Feldversuchen an mehreren Standorten sowohl pflanzenbauliche als auch genetische Voraussetzungen für Kältetoleranz und angepasstes Reifeverhalten untersucht. Diese Erkenntnisse sollen Züchtern als Grundlage für die Auswahl geeigneter Sorten dienen und auch Landwirten praktische Anbauhilfen bieten. Mit Hilfe prozessbasierter Pflanzenwachstumsmodelle lassen sich verschiedene Sorghum-Genotypen virtuell unter unterschiedlichen Klima- und Standortbedingungen testen. So können langfristig die Ertragspotenziale und Klimaschutzwirkungen bewertet werden.

#### METHODIK

##### Räumlich-zeitliche Eignungsanalyse von Sorghum in Deutschland

Für ganz Deutschland wurde eine räumlich-zeitliche Analyse für 13.785 Rasterzellen (5 × 5 km) durchgeführt, um geeignete Regionen für den Anbau von Sorghum zu identifizieren. Die Analyse stützte sich auf historische Wetterdaten aus 30 Jahren (1976–2005) und Klimaprognosen für den Zeitraum 2031–2060, die auf neun Klimaszenarien basieren. Zwei „Representative Concentration Pathways“ (RCP 4.5 und RCP 8.5) bilden moderate bzw. hohe Emissionsentwicklungen ab. Anhand von Temperatur- und Niederschlagsdaten wurden Wetterindizes (WIs) entwickelt und gemeinsam mit Bodeninformationen (BÜK250, Müncheberger Bodenqualitätsbewertung) ausgewertet. Mittels Hauptkomponentenanalyse (PCA) erfolgte die Einteilung in Eignungskcluster. Zur Bewertung der Treibhausgasemissionen wurde eine Lebenszyklusanalyse (LCA) mit Daten aus 18 Feldversuchen durchgeführt. Maisgenotypen aus denselben oder benachbarten Versuchen dienten als Referenz bei der Einschätzung der Umweltleistung von Sorghum.

##### Feldversuche zu Ertrag und Kühletoleranz

104 Sorghum Testhybriden, die aus Kreuzungen mit bereits an die deutschen Klimabedingungen angepassten Elternlinien stammen (JLU Gießen), wurden zusammen mit den Elternlinien und kommerziellen Sorghum- und Maissorten in Feldversuchen angebaut. Die Versuche wurden zweijährig an verschiedenen Standorten entlang einer Nord-Südachse in Deutschland durchgeführt. Dabei dienten die Standorte Quedlinburg, Groß-Gerau und Moosburg als

#### HIGHLIGHTS

- Sorghum hat die Fähigkeit, einen stabilen Ertrag zu erzielen und hat gleichzeitig einen geringeren CO<sub>2</sub>-Fußabdruck als Mais.
- Sorghum-Hybriden zeigten eine gute Anbaueignung an mehreren Standorten durch höhere Erträge im Vergleich zu ihren Eltern.
- Eine gute phänotypische Differenzierung der Sorghum-Hybriden hinsichtlich ihrer Kühletoleranz ist in der frühen Jugendentwicklung möglich.

Ertragsstandorte, hier wurden Ertrags- und phänologische Parameter erfasst. Alle Parameter wurden mittels gemischter linearer Modelle in R statistisch ausgewertet. Zur Erfassung der Kühletoleranz in der frühen Jugendentwicklung wurden am Standort Groß Lüsewitz Feldversuche zu zwei Aussaatterminen (Frühsaat, Kontrollsaat) mit 200 Testhybriden, Eltern und Referenzen etabliert. Eine Bonitur wurde zu verschiedenen Entwicklungsstadien durchgeführt. Darüber hinaus wurden unter kontrollierten Bedingungen Kaltkeimtests sowohl mit Saatgut aus geselbsteten Rispen (also Pflanzenrispen, die durch Selbstbestäubung entstanden sind) verschiedener Kreuzungs-Nachkommenchaften als auch Saatgut der Testhybriden durchgeführt, um die Variabilität in der Kühletoleranz besser abschätzen zu können.

##### Analyse der Wurzeleigenschaften

Am Standort Braunschweig wurden in zweijährigen Feldversuchen zehn ausgewählte Sorghum-Testhybriden sowie drei Sorghum- und zwei kommerzielle Maissorten in zwei Bewässerungsvarianten – mit und ohne – untersucht. Ziel war es, das Potenzial der Genotypen zur Anreicherung organischen Kohlenstoffs (SOC) im Boden zu bewerten. Obwohl der Standort in den letzten Jahren als Trockenstressstandort galt, trat jedoch in beiden Versuchsjahren (2023 und 2024) aufgrund überdurchschnittlicher Niederschläge während der Vegetationsperiode kein ausgeprägter Trockenstress auf.

Es wurden physiologische, phänologische und Ertragsdaten erhoben. Zur Untersuchung der Wurzeleigenschaften der getesteten Genotypen wurden Bodenkerne entnommen und anschließend mit Hilfe von der Core-Break-Methode sowie Root-Scans analysiert. Der Beitrag von ober- und unterirdischer Biomasse zum organischen Bodenkohlenstoff wurde mit Hilfe des C-Tool-Modells quantifiziert.



## KLIMAWIRKUNG

Sorghum ist eine vielversprechende alternative Kulturpflanze für Regionen, die zu Dürre und suboptimalen Bodenbedingungen neigen. Sie beweist ihre Fähigkeit, einen stabilen Ertrag zu erzielen und hat gleichzeitig einen geringeren CO<sub>2</sub>-Fußabdruck, da sie beispielsweise weniger Düngemittel als Mais benötigt. Der Anbau von Sorghum unterstützt somit den Übergang zu nachhaltigeren, emissionsarmen Agrarsystemen.

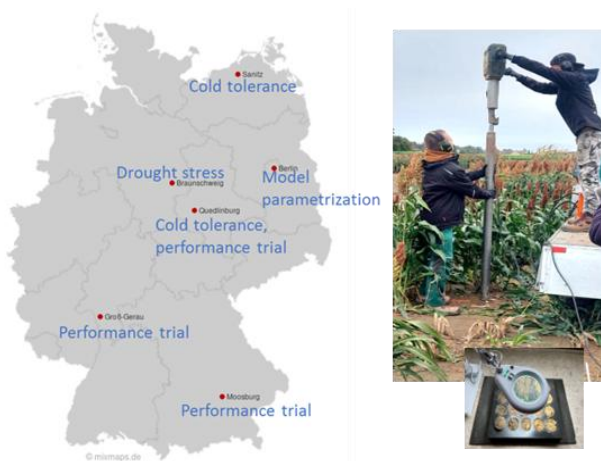


Abbildung 1: links: Übersicht der Feldversuche, rechts: Entnahme der Bodenkerne am Standort Braunschweig

## ERGEBNISSE

### Eignungsanalyse von Sorghum in Deutschland unter Bedingungen des Klimawandels

Die Eignungsanalyse ergab, dass vier Hauptregionen in Deutschland sich in ihrem Potenzial für den Anbau von Sorghum unterscheiden (Abb. 2): Cluster Nr. 1 (Nord- und Ostdeutschland), das aufgrund sandiger Böden und geringer Niederschläge oft als weniger produktiv angesehen wird, erweist sich als sehr gut geeignet für den Anbau von Sorghum. Diese Regionen profitieren von geringerer Kältebelastung (weniger Tage, an denen die Mindesttemperatur unter 5 °C fällt), längeren Wachstumsperioden und Böden, die für den geringen Nährstoffbedarf der Pflanze geeignet sind. Im Cluster Nr. 2 (Westen und Rheintal) kann Sorghum früher ausgesät und später geerntet werden, was den Einsatz spät reifender Sorten ermöglicht. Allerdings könnten die fruchtbaren Böden und ausreichenden Niederschläge dort den Anbau von Sorghum weniger attraktiv machen. Traditionelle Kulturen wie Mais sind für diese Bedingungen besser geeignet. Die zentralen und südlichen Zonen (Cluster 3 und 4) sind aufgrund der Höhenlage, der Temperaturschwankungen (mehr Tage mit Kältestress) und der kürzeren Vegetationsperiode einem höheren Risiko von Ernteaussfällen ausgesetzt, was den Anbau spät reifender Sorten erschwert.

Klimaprognosen deuten darauf hin, dass der Klimawandel bis Mitte des Jahrhunderts die Nachhaltigkeit des Sorghumanbaus weiter verbessern wird. Durch frühere Aussaat, spätere Ernte und längere Vegetationsperioden wird sich die Zahl der Regionen erhöhen, in denen Sorghum erfolgreich in die Fruchtfolge integriert werden kann, da das Risiko von Kältestress und Ernteaussfällen geringer wird.

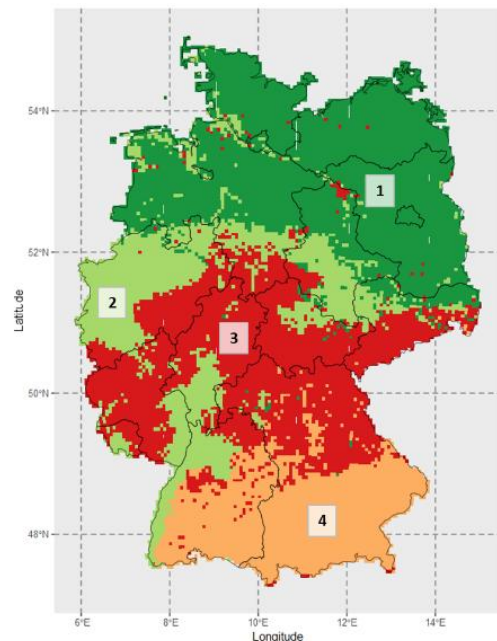


Abbildung 2: Eignungsanalyse des Sorghumanbaus in Deutschland auf Grundlage der klimatischen Bedingungen und der Bodenbeschaffenheit.

Sorghum kann die regionale Abhängigkeit von Mais in Gebieten mit zunehmendem Trockenstress oder begrenzter Bodenfruchtbarkeit verringern.

### Feldversuche zur Ertragsprüfung

Basierend auf den erhobenen Ertragsdaten an drei Standorten über zwei Jahre wurden adjustierte Mittelwerte mit Hilfe gemischter linearer Modelle berechnet. Die Ergebnisse variierten in Abhängigkeit sowohl vom Genotyp als auch von den standörtlichen Bedingungen. Testhybride wiesen einen höheren Kornertag im Vergleich zu ihren Eltern auf (Abb. 3). Außerdem blühten sie im Durchschnitt früher als die Mutterlinien, aber später als die kommerziellen Sorten. Positive Korrelationen wurden insbesondere zwischen der Pflanzenhöhe, Kornertag und Tausendkorngewicht beobachtet. Die verschiedenen Ertragsparameter korrelierten zudem stark innerhalb der Standorte Quedlinburg, Groß-Gerau und Moosburg, die sich alle drei für den Sorghumanbau eignen. Unter den drei Standorten erreichten die Sorghumgenotypen in Quedlinburg, dem nördlichsten Standort, die höchsten Ertragswerte, was sicherlich auch auf die sehr guten Bodenbedingungen zurückzuführen ist.

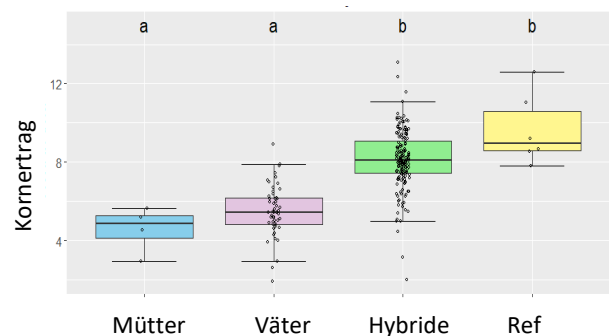


Abbildung 3: Kornertag (t/ha) der Sorghumgenotypen über zwei Jahre und drei Standorte. Ref: kommerzielle Referenzsorten.

Die allgemeine Kombinationsfähigkeit (GCA) der Elternlinien und die spezifische Kombinationsfähigkeit (SCA) der Hybriden wurden anhand des Kornertags und weiterer

Ertragsparameter mittels eines gemischten linearen Modells berechnet. Die GCA beschreibt die generelle Eignung eines Genotyps als Elternlinie für die Hybridzüchtung, während die SCA angibt, welche Hybridkombinationen besonders leistungsstark sind. Bei den getesteten Elternlinien wiesen knapp 50 % positive GCA-Effekte auf. Das folgende Ranking (Abb. 4) identifiziert Elternlinien mit besonders hoher Kombinationsfähigkeit für den Kornertrag, aber auch für andere Parameter wie Tausendkorngewicht und Pflanzenhöhe. Diese Informationen ermöglichen die Auswahl besonders geeigneter Eltern für zukünftige Kreuzungen. Auch bei den Testhybriden wiesen etwa 50 % einen positiven SCA-Effekt auf. Die SCA-Analyse für den Kornertrag zeigt besonders erfolgreiche Kreuzungen, die in zukünftige Züchtungsprogramme übernommen werden können.

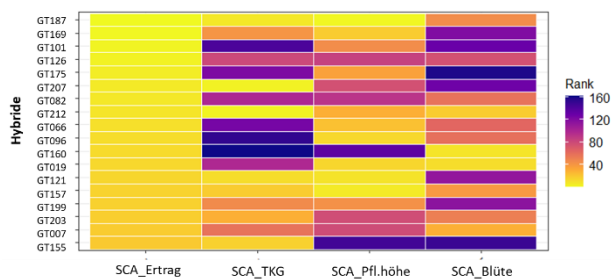


Abbildung 4: Rangliste der Testhybriden anhand ihrer SCA-Effekte für Kornertrag und weitere Parameter. SCA: spezifische Kombinationsfähigkeit, TKG: Tausendkorngewicht, Pfl.höhe: Pflanzenhöhe.

#### Kühletoleranz

Die Versuche zur Kühletoleranz in der Keimlingsphase und Jugendentwicklung wurden zweijährig mit jeweils zwei Aussaatzeitpunkten am nördlichsten Versuchsstandort durchgeführt. Bei Genotypen, die in beiden Jahren geprüft wurden, erlaubten die Anzahl der aufgelaufenen Pflanzen 20 Tage nach Aussaat sowie das Erreichen von BBCH 21 eine gute Differenzierung des Sorghum-Materials. Für die genannten Merkmale wurde eine breite Variabilität in der Reaktion der Genotypen wie auch eine signifikante Wechselwirkung mit dem Aussaattermin gefunden, die auf phänotypische Unterschiede in der Kühletoleranz der frühen Jugendstadien schließen lassen (Abb. 5). Auch zu Beginn des Rispenschiebens (BBCH 51) und der Blüte (BBCH 61) wurde eine signifikante Differenzierung bezüglich des Genotyps in Abhängigkeit des Aussaattermins ersichtlich. Die physiologische Reife (BBCH 89) erreichten die Sorghumgenotypen in beiden Jahren in der Frühsaat zum Teil, in der Normalsaat zum größeren Teil nicht.

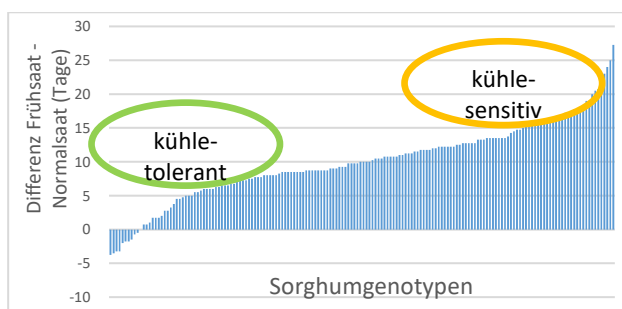


Abbildung 5: Unterschiede im Erreichen von BBCH 21 (Differenz zwischen Frühsaat (FS) und Kontrolle (NS) in Tagen) als indirektes Maß der Kühletoleranz für die zweijährig geprüften Sorghumgenotypen.

Die Keimtests erfolgten bei einer Temperatur von 12 °C (Kühlestress) und 24 °C (Kontrolle). Die Samen wurden 3, 6, 10 und 14 Tage nach Start des Keimversuchs (DAS) auf das Vorhandensein von Wurzel und Spross untersucht. Die beste Differenzierung in der Kühlestressvariante für das Vorhandensein eines Wurzelkeims war 6 Tage nach Versuchsbeginn, für das Vorhandensein von Wurzel- und Sprosskeim nach 10 und 14 Tage. Die Variabilität in der Keimungsrate (Stress/Kontrolle in %) in der Reaktion auf den Kühlestress im untersuchten Material war sehr hoch (Abb. 6), was zeigt, dass in der Züchtung von Sorghum auf Kühletoleranz selektiert werden kann.

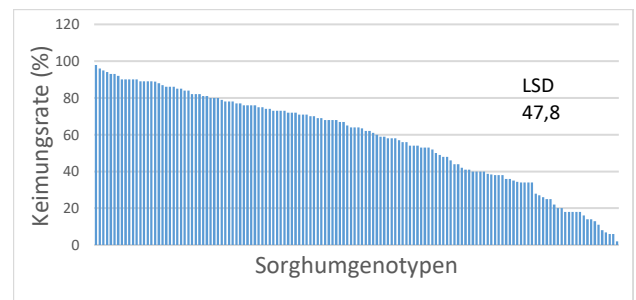


Abbildung 6: Keimungsrate vollständig gekeimter Samen 14 Tage nach Start des Keimversuchs bei 12 °C. Verwendet wurde sowohl Saatgut aus geselbsteten Rispen verschiedener Kreuzungsnachkommen als auch Saatgut der Testhybriden (Ernte 2023).

#### Analyse der Wurzeleigenschaften

Die Feldversuche mit zehn ausgewählten Testhybriden sowie kommerziellen Mais- und Sorghumsorten wurden zweijährig am Standort Braunschweig durchgeführt. Aufgrund der erheblichen Niederschläge in beiden Versuchsjahren werden die in diesem Bericht dargestellten Ergebnisse als Kombination beider Behandlungen – Bewässerung und Trockenstress – zusammengefasst und gemeinsam präsentiert.

Im Oberboden zeigte Mais einen Trend zu einer höheren Wurzellängendichte im Vergleich zu Sorghum. In den tieferen Bodenschichten (Mittelschicht und Unterboden) hingegen wiesen sowohl Sorghum-Testhybriden als auch kommerzielle Sorghumsorten einen Trend (statistisch nicht signifikant) zu einer höheren Wurzellängendichte im Vergleich zu Mais auf (Abb. 7). Das Potenzial von Sorghum, in tieferen Bodenschichten eine höhere Wurzellängendichte als Mais zu entwickeln, könnte unter Bedingungen begrenzter Bodenfeuchtigkeit ein Vorteil für die Ertragsbildung sein, da dadurch ein größeres Bodenvolumen erschlossen werden kann. Darüber hinaus könnte die höhere Wurzellängendichte von Sorghum zu einem höheren Eintrag von organischem Bodenkohlenstoff (SOC) im Vergleich zu Mais beitragen. Über die Quantifizierung des SOC-Eintrags durch das Wurzelsystem von Sorghum und Mais kann derzeit noch keine abschließende Aussage getroffen werden.

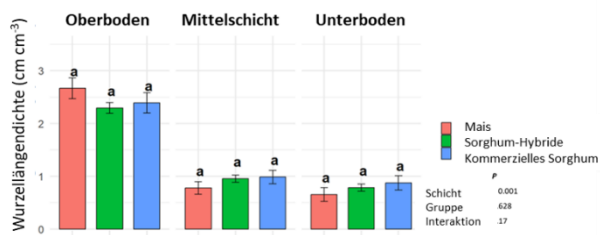


Abbildung 7: Mittelwerte der Wurzellängendichte im Oberboden (0–30 cm), in der Mittelschicht (30–60 cm) und im Unterboden (60–100 cm), entnommen bei der Ernte von Sorghum-Testhybriden, kommerziellem Mais und Sorghum (2023). Die Buchstaben über den Mittelwerten zeigen, ob die Unterschiede zwischen den Gruppen innerhalb einer Bodenschicht signifikant sind ( $p < 0,05$ ; Tukey-Test); gleiche Buchstaben bedeuten keine signifikanten Unterschiede.

### Sorghum vs. Mais: Wer gewinnt beim Kohlenstoff?

Eine vergleichende Bewertung von 18 verschiedenen Umgebungen (Standort, Jahr, Bewässerungssystem) bestätigte, dass Sorghum eine stabilere Umweltbilanz aufweist als Mais. Mais erzielt zwar höhere Erträge, verursacht jedoch aufgrund seines hohen Bedarfs an Düngemitteln auch mehr Treibhausgasemissionen pro Hektar. Sorghum hingegen erzielt unter trockenen Bedingungen und bei geringem Input stabile Erträge, was zu einem geringeren oder ähnlichen CO<sub>2</sub>-Fußabdruck pro kg Kornerntrag führt. In Dürrejahre und auf leichten oder sandigen Böden übertraf Sorghum in der Regel den Mais hinsichtlich des Ertrags und wies durchweg eine höhere Emissionseffizienz auf. In bewässerten Systemen und in feuchten Jahren mit schweren, fruchtbaren Böden konnte Sorghum den Mais aufgrund seines überlegenen Ertragspotenzials nicht übertreffen. Die an verschiedenen Standorten getesteten Sorghum-Hybriden zeigten aufgrund ihres höheren Ertragspotenzials und ihrer verbesserten Stresstoleranz eine weitere Verringerung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks (CFP, carbon footprint) (Abb. 8). Dies deutet darauf hin, dass der Sorghumanbau zu den Klimaschutzzielen beitragen und den Übergang zu emissionsärmeren Anbausystemen unterstützen könnte, insbesondere unter Berücksichtigung künftiger Klimabedingungen.

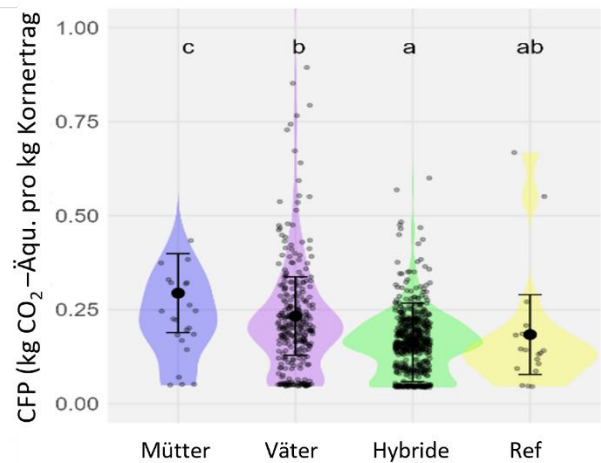


Abbildung 8: Marginaler mittlerer CFP der Hybride verglichen mit den Elternlinien und kommerziellen Referenzen (Ref). Rund 200 Genotypen wurden in verschiedenen Umwelten getestet.

### SCHLUSSFOLGERUNGEN

Sorghum hat in vielen Regionen Deutschlands ein hohes Potenzial als zukunftsfähige Kulturpflanze. Steigende Temperaturen und längere Vegetationszeiten machen Sorghum zunehmend zu einer attraktiven Alternative zu Mais auf trockenen und wenig fruchtbaren Standorten. Neue Sorghum-Testhybriden erzielten höhere Erträge als ihre Elternlinien, was ihr Züchtungspotenzial unterstreicht. Da sich Ertrag und Reife je nach Standort deutlich unterscheiden, ist eine gezielte Sortenwahl – insbesondere kühetoleranter und frühreifer Genotypen für nördliche Regionen – entscheidend.

### AUSGEWÄHLTE VERÖFFENTLICHUNGEN

- Hajjarpoor A et al. (2023): Germany-wide suitability analysis of sorghum cultivation for climate change mitigation. Proceedings of the Digital Tools, Big Data, Modeling and Sensing Methods for Sustainable and Climate Smart Crop and Grassland Systems, Göttingen, 4-6.

### Weitere Informationen:

<https://wissen.julius-kuehn.de/klimaschutz/projekte/erhoehung-kohlenstoffspeicherpotentiale/sorghum>

<https://www.ressortforschtklima.de/beteiligte-projekte/sorghum>

### HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN FÜR POLITIK UND PRAXIS

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass Sorghum eine strategische Rolle bei der Anpassung der deutschen Landwirtschaft an den Klimawandel spielen kann. Seine Eignung für trockene Gebiete, sein im Vergleich zu Mais geringerer Düngbedarf sowie sein Beitrag zum Aufbau von Bodenkohlenstoff steht im Einklang mit den aktuellen politischen Zielen in Bezug auf Resilienz, Diversifizierung und Nachhaltigkeit. Eine gezielte Förderung regionaler Versuche, Züchtungen und der Integration in Anbausysteme würde dazu beitragen, dieses Potenzial in größerem Maßstab zu erschließen.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Landwirtschaft, Ernährung  
und Heimat

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Humusaufbau mit mehr Wurzeln

Axel Don und Laura Reinelt (Thünen-Institut); Sigrun Wagner und Lorenz Kottmann (Julius Kühn-Institut)

### ZIELSETZUNG

Wurzelbiomasse trägt im Vergleich zu oberirdischer Biomasse besonders effektiv zum Humusaufbau und somit zur Kohlenstoffspeicherung in Böden bei. Daher könnte die Wahl von Ackerkulturararten und -sorten mit hoher Wurzelbiomasse eine effektive Klimaschutzoption sein, sowohl bei Hauptkulturen als auch bei Zwischenfrüchten. Außerdem kann sowohl reduzierte Düngung als auch der zukünftig erhöhte atmosphärische Kohlenstoffgehalt das Pflanzenwachstum beeinflussen und neben Auswirkungen auf den Ertrag auch Auswirkungen auf das Wurzelwachstum und die Wurzelbiomasse haben. Stickstoff (N)-düngung ist essenziell für landwirtschaftliche Produktivität, Überschüsse und Verluste bringen aber erhebliche Probleme für die Umwelt mit sich. Die EU „Farm to Fork Strategy“ enthält daher das Ziel, bis 2030 die Stickstoffdüngung um 20 % zu reduzieren.

Bislang gab es jedoch nur wenige Daten dazu, wieviel Wurzelbiomasse die heutzutage angebauten Ackerkulturen ausbilden, wie sich aktuelle Sorten dabei unterscheiden und welche Auswirkungen eine reduzierte N-Düngung und erhöhter CO<sub>2</sub>-Gehalt auf das Wurzelwachstum haben. Ziel des WurCel-Projekts war es deshalb, dies zu untersuchen und die Klimaschutzoption Humusaufbau in Ackerböden durch mehr Wurzeln umfassend zu quantifizieren und zu bewerten.

### METHODIK

Das WurCel-Projekt umfasst vier Themengebiete: 1) Zwischenfrüchte, 2) Auswirkung von reduzierter N-Düngung, sowie 3) erhöhtem CO<sub>2</sub> auf die Wurzeleistung und 4) Sortenwahl. Sowohl der Methoden- als auch der Ergebnissteil ist in diese Themen gegliedert. Zusätzlich haben wir eine Methode weiterentwickelt, um die Durchwurzelung schneller und effizienter zu quantifizieren.

### Zwischenfrüchte

Der Anbau von Zwischenfrüchten ist eine vieldiskutierte Maßnahme für den Humusaufbau in der Landwirtschaft, doch für eine genaue Abschätzung der Humusaufbaupotenziale fehlt es an Daten, insbesondere zum Kohlenstoffeintrag durch unterirdische Biomasse über Wurzeln. Anfang November 2021 und 2022 wurden 12 verschiedene Zwischenfruchtarten auf Versuchsflächen des Saatgutherstellers KWS mit Einzelkulturen, Mischungen und unterschiedlichen Aussaatzeitpunkten beprobt, ausgewaschen und ausgewertet.

### Auswirkung von reduzierter N-Düngung

Wir haben 2023 Bodenkerne aus 20 Düngungsversuchen von unterschiedlichen Hauptkulturen in ganz Deutschland entnommen, jeweils aus einer Variante mit Düngung nach Düngeverordnung und in einer Variante mit einer um 20 % reduzierten Stickstoffdüngung (Abb. 1).

### HIGHLIGHTS

- Die Wurzelbiomasse von Kulturpflanzen wird stark durch die Wahl der Kultur und Sorte sowie die Bewirtschaftung beeinflusst. Bodeneigenschaften und klimatische Faktoren spielen jedoch auch eine große Rolle.
- Reduzierte N-Düngung reduziert im Getreide die Wurzelbiomasse trotz nur geringer Ertragsrückgänge.
- Zwischenfrüchte lassen sich durch gezielte Sortenwahl und frühe Aussaat hinsichtlich Wurzelbiomasse optimieren.
- Unter guten Bedingungen kann erhöhte atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration zu erhöhter Wurzelbiomasse führen.
- Gezieltes Wurzelmanagement kann Humusaufbau und C-Bindung generieren, ohne tiefgreifende Veränderungen der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung voraus zu setzen.

### Auswirkung von Sortenwahl und erhöhtem CO<sub>2</sub>

Der Unterschied verschiedener Weizensorten, sowie den Einfluss von erhöhtem atmosphärischen Kohlenstoffgehalt auf das Wurzelwachstum haben wir mit Hilfe einer FACE (Free Air Carbon Dioxide Enrichment) Anlage untersucht. In zwei Jahren (2023 und 2024) haben wir auf den Versuchsfeldern des Julius Kühn-Instituts in Braunschweig insgesamt 448 Bodenkerne (1 m tief) von sieben verschiedenen Weizensorten unter aktuellen (420 ppm) und zukünftigen erhöhten atmosphärischen CO<sub>2</sub> Bedingungen (600 ppm) gezogen, um die Auswirkung auf die Wurzelbildung zu untersuchen.

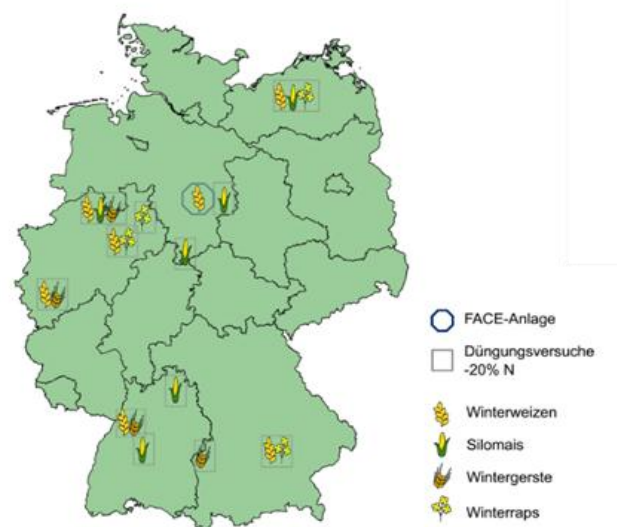


Abbildung 1: Feldversuche, in denen im Sommer 2023 Wurzelbeprobungen im Rahmen des WurCel-Projekts durchgeführt wurden.



## KLIMAWIRKUNG

Der Klimaschutzeffekt liegt primär auf der Erhöhung der Kohlenstoffspeicherung in Ackerböden durch Arten und Sortenwahl bzw. Züchtung Richtung mehr Wurzeln. Zusätzlich kann eine bessere Durchwurzelung des Bodens auch eine Klimaanpassung an Trockenheit darstellen. Das managebare Potenzial Wurzelbiomassen im Ackerbau zu erhöhen (oder auch zu reduzieren) liegt kurzfristig bei ca. 10 %. Größere Potenziale könnten nur langfristig realisiert werden.

Eine 10 %ige Erhöhung der durchschnittlichen Wurzelbiomasse in deutschen Ackerböden und der damit einhergehende zusätzliche C-Eintrag in Böden führt zu einem Bodenkohlenstoffaufbau, der einer C-Bindung von 1,3 bis 3,5 Mio. t CO<sub>2</sub> pro Jahr entspricht. Dieses Potenzial bezieht sich auf einen Zeithorizont von 30 Jahren bis ein neues Fließgleichgewicht erreicht ist.

## Methodenentwicklung für Wurzeluntersuchung

Wurzelsysteme sind komplex und sehr variabel, da sie von Umweltfaktoren beeinflusst werden. Erschwerend kommt hinzu, dass Untersuchungen von Wurzeln sehr mühsam, arbeits- und zeitintensiv sind. Meist sind manuelle Verfahren erforderlich, um die Wurzeln vom Boden zu trennen. Eine Erleichterung stellt die Bruchkernmethode dar, bei der die gezogenen Bodenkerne alle 10 cm gebrochen und die Wurzeln auf beiden Bruchflächen gezählt werden. Auf diese Weise muss nur ein Teil der Bruchkerne gewaschen und gescannt werden, da sich dieses Ergebnis mit der Wurzellängendichte korrelieren lässt. Herausforderungen hierbei sind neben der Zeitintensität auch die Variabilität zwischen den Bearbeitern, da die Zählung manuell erfolgt. Hierbei kann die im WurCel-Projekt weiter entwickelte BlueBox mit UV-Licht helfen (Abb. 2). Wir haben den Bau der BlueBox vereinfacht und die Bildbearbeitung verbessert. Starke Korrelationen von den Ergebnissen der BlueBox mit den manuell gezählten Wurzeln, sowie mit der Wurzellängendichte zeigen, dass diese Methode sehr vielversprechend ist und hierdurch Wurzelforschung vereinfacht werden kann.

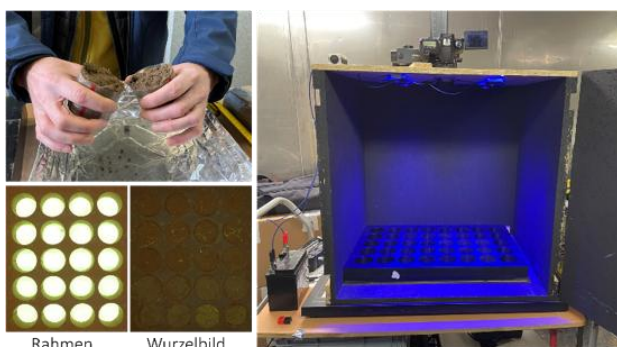


Abbildung 2: Bilderfassung der Wurzeln mit Bruchkernmethode und BlueBox

## ERGEBNISSE

### Zwischenfrüchte

Die Wurzelbiomasse in den Einzelkulturen aus dem Jahr 2021 unterschied sich deutlich zwischen den Arten. Dabei waren Ölrettich, Phacelia und Rauhafer besonders wurzelstark und zeigten damit das höchste Humusaufbaupotenzial (Abb. 3).

Die Mischungen unterschieden sich nicht in ihrer ober- oder unterirdischen Biomasse von den Einzelkulturen. Die Wurzelbiomasse sank bei Aussaat Mitte September um durchschnittlich 66 % im Vergleich zur Aussaat Anfang August, während die oberirdische Biomasse nur um durchschnittlich 40 % sank. Damit sank das Wurzel-zu-Spross-Verhältnis um durchschnittlich 44 %. Dies legt nahe, dass das Humusaufbaupotenzial von Zwischenfrüchten stärker als erwartet durch eine möglichst frühe Aussaat oder Untersaat, z. B. mit Drohnen in die bestehende Hauptkultur, gesteigert werden könnte. Diese Ergebnisse sind auch relevant für die Bodenkohlenstoffmodellierung, für die bislang konstante Wurzel-zu-Spross-Verhältnisse unabhängig vom Aussaatzeitpunkt angenommen wurden. Im trockeneren Jahr 2022 war die Wurzelbiomasse der Zwischenfrüchte deutlich geringer als 2021. Dies verdeutlicht die starke Abhängigkeit der Humuswirkung von Zwischenfrüchten von klimatischen Faktoren.



Abbildung 3: Mittelwerte der ober- und unterirdischen Biomasse verschiedener Zwischenfruchtarten in Einzelkulturen mit unterschiedlichen Aussaatzeitpunkten im Jahr 2021.

### Auswirkung von reduzierter N-Düngung

In allen Kulturen gab es nur kleine und nicht statistisch signifikante Auswirkungen der reduzierten Düngungen auf den Ertrag. Im Winterweizen wurde die Wurzelbiomasse in 0–15 cm Tiefe durch die reduzierte Düngung um durchschnittlich 9,1 % ( $p = 0,07$ ) verringert, während der Ertrag nicht statistisch signifikant und im Durchschnitt nur um 3 % verringert war (Abb. 4). In der Wintergerste lag ein ähnlicher Trend vor. Eine verringerte Wurzelbiomasse führt jedoch langfristig zu Humusverlusten.

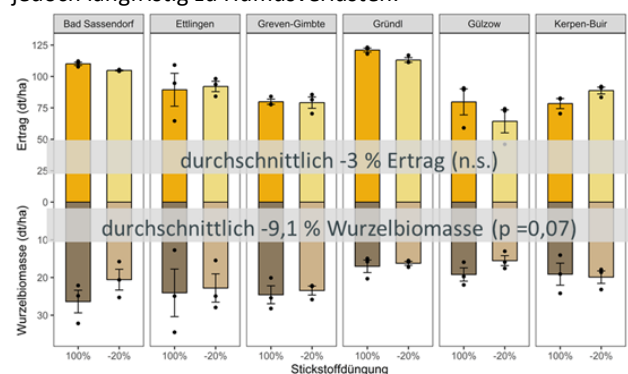


Abbildung 4: Weizenertrag und Wurzelbiomasse bis 1 m Tiefe unter 100 % und -20 % Stickstoffdüngung in den beprobten Düngungsversuchen.

Bei Silomais und Winterraps hatte die reduzierte Düngung keine Auswirkungen auf die Wurzelbiomasse.

### Auswirkung von erhöhtem CO<sub>2</sub>

Klimatische Faktoren hatten einen größeren Einfluss auf die Wurzellänge als erhöhtes CO<sub>2</sub>. In dem sehr trockenen Jahr 2024 war die Wurzellängendichte signifikant geringer als 2023 und die erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentration hatte keinen

positiven Effekt auf das Wurzelwachstum. In 2023 war die Wurzellänge unter erhöhtem CO<sub>2</sub> vor allem im Oberboden signifikant erhöht (Abb. 6). Unter aktuellen Bedingungen fanden wir in den ersten 30 cm eine durchschnittliche Wurzellängendichte von 5,5 cm/cm<sup>3</sup> und 6,0 cm/cm<sup>3</sup> unter erhöhtem CO<sub>2</sub>. In 30-60 cm Tiefe konnten wir keine signifikanten Unterschiede feststellen, aber bei 60-90 cm war die Wurzellängendichte unter erhöhtem CO<sub>2</sub> ebenfalls signifikant erhöht (durchschnittlich 0,6 cm/cm<sup>3</sup> und 0,4 cm/cm<sup>3</sup>).

### Weizensorten

Unsere Ergebnisse zeigen unter aktuellen Bedingungen signifikante Unterschiede im Wurzelsystem verschiedener Weizensorten in verschiedenen Bodentiefenstufen (Abb. 5). Unter erhöhtem CO<sub>2</sub> sahen wir jedoch keine Unterschiede. Auch bei der Wurzelbiomasse von Weizensorten haben klimatische Faktoren eine große Rolle gespielt. 2023 waren Sortenunterschiede in den oberen Bodenschichten signifikant, während sich Sorten in 2024 in tiefere Bodenschichten unterschieden.

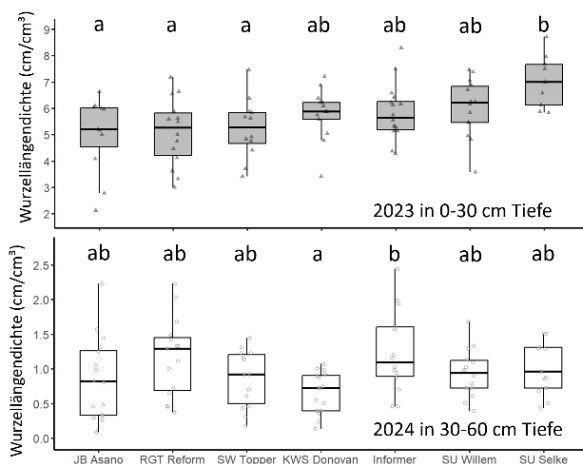


Abbildung 5: Unter aktuellen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen konnten 2023 in den ersten 30 cm und 2024 in der Tiefe von 30-60 cm signifikante Sortenunterschiede identifiziert werden (gekennzeichnet durch die unterschiedlichen Buchstaben).

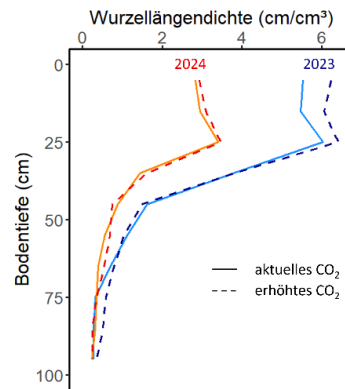


Abbildung 6: Wurzelverteilung im Boden bis 1 m Tiefe in 2023 und 2024 für Weizen unter aktuellen Bedingungen und unter erhöhten atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen.

### SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Wurzelforschung von Kulturpflanzen befindet sich noch am Anfang. Dies hängt u. a. mit dem enormen Aufwand der Wurzelanalytik zusammen. Im WurCel-Projekt konnten wir aber zeigen, dass Wurzeln viel stärker als bisher angenommen durch Bewirtschaftungsentscheidungen beeinflusst werden. Dadurch ergibt sich eine direkte Option über mehr Wurzelbiomasse zum Humusaufbau in Ackerböden beizutragen. Der Humuseffekt variiert aber stark zwischen den Jahren und den Standorten. Die im WurCel-Projekt entwickelten Wurzelanalysemethoden können genutzt werden, um einen systematischen größeren Datensatz zu generieren, der es erlaubt über Standorte und Jahre hinweg Wurzelbiomasse, Spross/Wurzelverhältnisse und Ertrag/Wurzelverhältnisse vorherzusagen. Wurzelstarke Sorten und Anbaumethoden, die die Wurzelbildung fördern, können nicht nur die Bodenkohlenstoffvorräte in Ackerböden erhöhen, sondern auch die Anpassung der Landwirtschaft an den Klimawandel verbessern. Nur eine ausreichende und tiefe Durchwurzelung verschafft Kulturpflanzen den Zugang zu den Bodenwasserressourcen in Ober- und Unterböden.

### Weitere Informationen:

<https://www.thuenen.de/de/fachinstitute/agrarklimaschutz/projekte/wurcel>

<https://wissen.julius-kuehn.de/klimaschutz/projekte/erhoehung-kohlenstoffspeicherpotentiale/wurcel>

### Handlungsempfehlungen für Politik und Praxis

Pflanzenwurzeln sind sowohl für den Klimaschutz als auch die Klimaanpassung zentral. Sie haben ein hohes Kohlenstoffbindungspotenzial, das nur durch Zusammenwirken verschiedener Akteure gehoben werden kann. Dazu zählen an erster Stelle Züchter und Saatguthersteller, die die Durchwurzelungsintensität als Züchtungsziel aufnehmen müssen. Verbesserte Methoden ermöglichen es die Wurzelanalytik im Freiland in hoher Wiederholung zu untersuchen. Mögliche Zielkonflikte zwischen Wurzelförderung und Ertragssicherung sind zu berücksichtigen. Schon jetzt sollten, auch vor dem Hintergrund des Klimawandels, Förderprogramme zu wurzelstarken Kulturen (z. B. Luzerne, Klee-Gras) oder zusätzlichen und optimierten Zwischenfrüchten für den Humusaufbau auf den Weg gebracht werden.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Landwirtschaft, Ernährung  
und Heimat

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Abwehr von Vorratsschädlingen in Deutschland – Untersuchungen zur hermetischen Lagerung und Früherkennung von Vorratsschädlingen im Lager und Feld

Cornel S. Adler, Benjamin Fürstenau, Camilla Albrecht, Christina Müller-Blenkle, Julia Büchner und Jovanka Saltzmann (Julius Kühn-Institut), Felicitas Schneider und Jones Athai (Thünen-Institut); Jens Begemann (Max Rubner-Institut)

### ZIELSETZUNG

Nacherteilverluste, die im Zuge des Klimawandels zunehmen, sowie treibhausgasrelevante Emissionen, die durch verderbende Vorräte und den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln im Vorratsschutz entstehen, müssen verringert werden. Zu diesem Zweck wurden in dem AVoID-Projekt folgende Schwerpunkte untersucht:

#### Untersuchung zur hermetischen Lagerung von Körnerschüttgütern und Bewertung der Ökonomie und der ökologischen und sozialen Nachhaltigkeit:

- **Untersuchung der Effektivität** bestehender, kommerziell verfügbarer hermetischer Lagergebäude und bisher nicht verbreiteter Methoden. Auch die historisch bekannte unterirdische hermetische Lagerung wurde mit einem in der Landwirtschaft verbreiteten GfK-Silo verglichen.
- **Ökonomische Analyse** zur vergleichenden Bewertung der Wirtschaftlichkeit von hermetischen gegenüber nicht hermetischen Getreidelagern in Deutschland.
- **Ökologische Bewertung** zum Vergleich der Umweltauswirkungen verschiedener Lagertechnologien, darunter die Flachlagerhalle, das Folienschlauchlager und das Rundsilo, mit neuen hermetischen Pilotsilos aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GfK) und Edelstahl. Dabei diente das Folienschlauchlager als etablierte hermetische Referenz.
- **Qualitative soziale Bewertung** zur Identifizierung potenzieller sozialer Risiken, Chancen und Belastungen während der durchzuführenden Arbeiten in den Lagervarianten während Aufbau, Betrieb und Abbau. Diese Hotspots sollten bei der Umsetzung der jeweiligen Lagervariante besondere Aufmerksamkeit bekommen, um Unfälle zu vermeiden oder Qualifikationsmaßnahmen rechtzeitig zu beginnen.

#### Früherkennung von Schädlingsvorkommen im Lager und Feld und Untersuchung des sich durch Klimawandel ändernden Artenspektrums

Im Rahmen eines deutschlandweiten Monitorings wurde das Auftreten und die Verbreitung bereits etablierter und potenziell neu eingewandelter vorratsschädlicher Insekten innerhalb von getreideproduzierenden und -lagernden Betrieben und insbesondere außerhalb der Lagereinrichtung im Feld systematisch überprüft. Weiterhin wurden die im Freiland eingesetzten Fallensysteme und Lockstoffe in Laborversuchen hinsichtlich ihrer Fangeffizienz und Wirksamkeit untersucht.

### METHODIK

In Labor- und Feldversuchen wurden verschiedene Formen der **hermetischen Lagerung** untersucht. Der Fokus lag auf der Überwachung der Sauerstoffgehalte während der Lagerung und deren Einfluss auf die Überlebensfähigkeit von vorratsschädlichen Insekten und der Getreidequalität im

### HIGHLIGHTS

- Hermetische Verfahren vermeiden Befall als mechanische Barriere, ermöglichen langfristige Getreidelagerung und unterdrücken bei ausreichender Gasdichtigkeit die Entwicklung vorhandener Schädlingspopulationen.
- Hermetische Lagerung ist bei Einsatz von Schlauchsilos in der Praxis kostengünstiger, als nicht hermetische Lagerung.
- Hermetische Lagerformen reduzieren Treibhausgas- und Toxizitätswirkungen und bieten Potenzial für klimafreundlichere Getreidelagerstrategien.
- Ein flächendeckendes Monitoring zur frühzeitigen Erkennung von Schädlingsvorkommen/-befall ist effektiv.
- Mehrere vorratsschädliche Insektenarten kommen entgegen der allgemeinen Annahme zahlreich im Feld vor. Häufigster Käfer ist der Getreidekapuziner; früher nur selten in Deutschland beobachtet.

Vergleich mit nicht hermetischer Lagerung. Methoden zur Beschleunigung der Sauerstoffreduktion wurden untersucht.

Die **ökonomische Analyse** erfolgte auf Basis der Kosten- und Leistungsrechnung. Erfasst und statistisch ausgewertet wurden fixe und variable Investitions- sowie Betriebskosten von Lagern unterschiedlicher Kapazität, technischer Ausstattung und Bewirtschaftungsform (ökologisch/konventionell) unter verschiedenen Klima- und Verlustszenarien. Datengrundlage war ein im Projekt erstellter Datensatz zu Getreidelagern in Deutschland (n = 600), darunter 30 hermetische Anlagen. Die Datenerhebung erfolgte mittels standardisierter Befragung. Untersucht wurden Flachlager, Rundsilo- und Sacklagersysteme darunter auch Siloschläuche.

Zur **ökologischen Bewertung** wurde die Methode Environmental Footprint 3.1 (adapted) angewendet. Die Modellierung erfolgte in SimaPro auf Basis von Emissionswerten aus der Ecoinvent-Datenbank. Als funktionelle Einheit diente die Lagerung von 1 t Getreide über ein Jahr, wobei alle Systeme auf eine Gesamtkapazität von 2000 t ausgelegt und über 25 Jahre amortisiert wurden. Der Folienschlauch besitzt als Einwegsystem nur eine Nutzungsdauer von einem Jahr. Betrachtet wurden die Indikatoren Treibhausgaspotenzial, Humantoxizität und Flächenverbrauch, bezogen auf die funktionelle Einheit.

Im Mittelpunkt der **sozialen Bewertung** standen Gesundheits- und Arbeitsschutz, Qualifikationsanforderungen sowie der qualitative Arbeitsaufwand. Die Analyse folgte einem qualitativ-semiquantitativen Ansatz auf Basis

einer Hotspot-Bewertungsskala, die Arbeitsaufwand, Qualifikation und Gefährdungspotenzial kombiniert. Bewertet wurde eine Flachlagerhalle, ein Folienschlauch und ein Rundsilos; zwei hermetische Pilotanlagen (oberirdisch, unterirdisch) konnten aufgrund begrenzter Datenlage nur teilweise bewertet werden.

Zur Früherkennung von Schädlingen wurden auf insgesamt 11 landwirtschaftlichen Betrieben (fünf Ökobetriebe), von 2023-25 verschiedene mit Lockstoffen versehene Insektenfallen (Trichterfallen und zwei Bodenfallen), innerhalb der Lager und im Freiland an angrenzenden Feldrändern aufgestellt. Die Fallen wurden monatlich kontrolliert, die gefangenen Insekten im Labor anhand morphologischer Merkmale identifiziert und gezählt.

In Laborversuchen wurde die Attraktivität mehrerer Pheromone ausgewählter Arten einzeln und in Kombination anhand von Verhaltenstests mit verschiedenen vorratschädlichen Käfern (*Rhyzopertha dominica*, *Trogoderma spp.*, *Lasioderma serricorne*) im statischen 4-Kammer-Olfaktometer, sowie in Flugkäfigen mit Bodenfallen überprüft.

## ERGEBNISSE

Die **hermetische Lagerung** reduziert Verluste im Vergleich zur nicht hermetischen Lagerung deutlich. In kommerziell verfügbaren hermetischen Säcken (Cocoons und Pouches) und Schläuchen sank der O<sub>2</sub>-Gehalt jedoch nicht dauerhaft auf ein insektensicheres Niveau. Bei korrekter Lagerung konnte das Getreide dennoch über ein Jahr hinweg in gutem Zustand gehalten werden. Durch zusätzliche Veratmer konnte der O<sub>2</sub>-Gehalt schneller gesenkt und eine sichere Lagerung auch bei kaltem oder nicht erntefrischem Getreide schneller erreicht werden (Abb. 1).

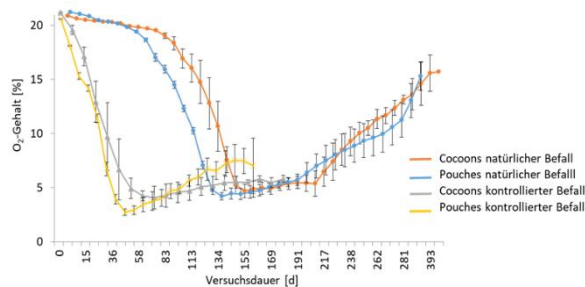


Abbildung 1: O<sub>2</sub>-Reduzierung in Cocoons und Pouches durch kontrollierten Käferbefall verglichen mit geringem natürlichem Befall

**Getreidequalität:** Sensorisch fanden sich in den untersuchten Cocoons und Pouches keine bis leichte Abweichungen, die auf Käferbefall hindeuten. Abwertende Veränderungen durch die hermetische Lagerung selbst konnten nicht festgestellt werden.

Im unterirdischen Silo führte das Einbringen von mehr als 150.000 Kornkäfern in insektendichten Säcken (Adulte und wöchentliche Brutstadien) zu einer O<sub>2</sub>-Abnahme auf lediglich 12 %, was auf ganzjährige Temperaturen von unter 6,5-8 °C zurückgeführt wird. Diese Temperaturen führen zum Tod in Larvenstadien und könnten das Verhungern älterer Tiere bewirkt haben.

Starker Befall mit dem Getreideplattkäfer (*Oryzaephilus surinamensis*) in einem ursprünglich für die Zementlagerung konzipierten Getreidesilo, der Austausch einer porös gewordenen Dichtung und die daraus resultierende hermetische Lagerung führten zu schneller O<sub>2</sub>-abnahme (Abb. 2) und einer effektiven Tilgung, obwohl das 44 Jahre alte Silo (Vol. 27 m<sup>3</sup>) nur zu zwei Dritteln mit Weizen befüllt war.

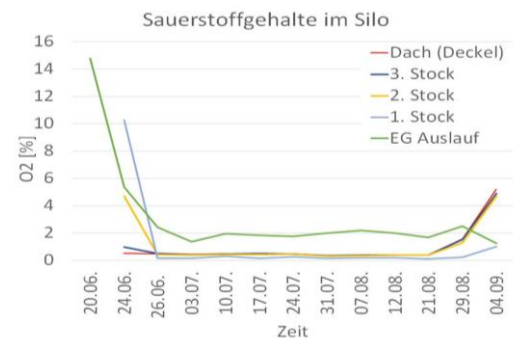


Abbildung 2: O<sub>2</sub>-Gehalte in verschiedenen Höhen eines hermetisch-verschlossenen Silos, mit stark befallenem Getreide.

Feste Silos hermetisch zu verschließen und den Sauerstoffgehalt zu überwachen, hat sich als schwierig erwiesen. Hier sollten zukünftig Kooperationen mit Silobauern und Herstellern von Sensoren angestrebt werden, um kabellose Getreideüberwachungssensoren zu entwickeln oder alle Sensoren mit einer gemeinsamen Energieversorgung und Datenableitung auszustatten.

Die **ökonomische Analyse** zeigt deutliche Unterschiede zwischen hermetischen und nicht-hermetischen Lagern. Obwohl hermetische Rundsilos und Sacklager höhere Investitionen als nicht-hermetische Rundsilos und Sacklager verursachen, lagen die durchschnittlichen Investitionskosten aller hermetischen Lager (193 €/t) unter denen der nicht-hermetischen Lager (289 €/t) sowie der Standorte mit einer Kombination beider Systeme (269 €/t). Auch die jährlichen Fixkosten der hermetischen Lager lagen im Mittel unter denen der nicht-hermetischen Lager und der Kombinationsstandorte.

Die geringsten jährlichen variablen Kosten verursachten hermetische Rundsilos und hermetische Folienschläuche, während hermetische Fass- und Sacklager die höchsten Kosten aufwiesen. Trotz der deutlich geringeren durchschnittlichen Lagerkapazität hermetischer Systeme (Ø 850 t) lagen deren variable Kosten je Tonne unter denen nicht-hermetischer Lager (Ø 2.418 t) und Kombinationsstandorte (Ø 2.500 t). Der Vergleich von hermetischen und nicht-hermetischen Lagern mit einer Kapazität von 1.000 t – teils modelliert, teils aus der Praxis abgeleitet – zeigt Kostenvorteile hermetischer Systeme infolge geringerer Verluste und niedrigerer Pflanzenschutzmittelkosten (PSM) zum Vorratsschutz. Eine Ausnahme bildet die hermetische Sacklagerung, bei der aufgrund hoher Verpackungs- und Arbeitskosten erhöhte Aufwendungen entstehen. Die Analyse der variablen Kosten unter feuchteren Ernte- und Lagerbedingungen zeigt, dass in nicht-hermetischen



Systemen neben einem erhöhten Pflanzenschutzmitteleinsatz insbesondere Arbeitsaufwand und Energiebedarf deutlich ansteigen (bis zu 34 €/t zusätzlich), während die Mehrkosten hermetischer Systeme vergleichsweise gering bleiben (bis zu 4 €/t) (Abb. 3). Im Praxisdurchschnitt weist die hermetische Lagerung die niedrigsten Gesamtkosten auf. Dies ist im Wesentlichen auf den hohen Anteil des Siloschlauchverfahrens zurückzuführen, für das keine Baukosten anfallen. Dieses Verfahren stellt somit die kostengünstigste Lagertechnik für Körnerschüttgüter dar.

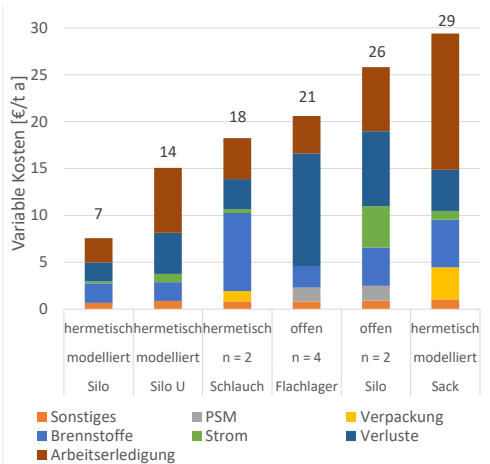


Abbildung 3: Variable Kosten hermetischer vs. nicht-hermetischer Lager mit 1.000 t Lagerkapazität (teils modelliert, teils aus der Praxis abgeleitet) in €/t Lagerkapazität und Jahr. Offen = nicht hermetisch, U = unterirdisch, Silo = Rundsilo

Die Ergebnisse der **ökologischen Bewertung** zeigen deutliche Unterschiede zwischen den untersuchten Lager-technologien. Je Wirkungskategorie wurde das emissionsstärkste System als Referenz (100 %) festgelegt, sodass die Umweltwirkungen der übrigen Lagerformen prozentual darauf bezogen sind. Im Treibhauspotenzial weist die Flachlagerhalle die höchsten Emissionen auf, gefolgt von Rundsilo und den hermetischen Pilotsilos aus Edelstahl und GfK; der Folienschlauch zeigt die geringsten Werte. In der Humantoxizität liegen hermetische Systeme ebenfalls deutlich unter den konventionellen Lagern, beim Flächenverbrauch jedoch darüber (Abb. 4).

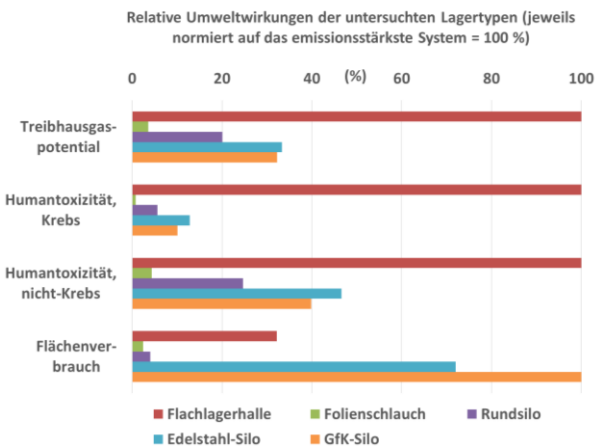


Abbildung 4: Relative Umweltwirkungen der untersuchten Lagertypen, jeweils normiert auf das emissionsstärkste System (= 100 %).

Neben den direkten Umweltwirkungen wurde auch der Einfluss möglicher Lagerverluste betrachtet. Die Produktion von 1 t Weizen bis zum Hof verursacht rund 422 kg CO<sub>2</sub>-

Äquivalente. Ein Lagerverlust von 2 % bzw. 5 % erhöht die feldseitigen Emissionen um etwa 8 bzw. 21 kg CO<sub>2</sub> je Tonne, entsprechend 17 bzw. 42 t CO<sub>2</sub> bei 2 000 t Lagerkapazität. Damit wird deutlich, dass selbst moderate Verluste messbar ins Gewicht fallen und hermetische Systeme mit geringeren Lagerverlusten ökologische Vorteile bieten.

Die **soziale Bewertung** zeigt deutliche Unterschiede zwischen den Lagertypen. In der Flachlagerhalle treten aufgrund arbeitsintensiver Tätigkeiten und Gefahrstoffexposition die höchsten Risiken auf. Der Folienschlauch liegt im mittleren Bereich der Bewertungsskala, mit erhöhten Belastungen bei Ein- und Auslagerung. Das Rundsilo ist insgesamt hoch eingestuft, vor allem durch Absturz- und Fumigationsrisiken. Die beiden Pilotsilos (GfK und Edelstahl) wurden auf 2 000 t skaliert.

Bezüglich **Früherkennung** wurden in den drei Versuchsjahren eine große Anzahl verschiedener vorrats-schädlicher Insektenarten (11 Motten-/25 Käferarten) sowohl im Innenbereich als auch im Freiland auf konven-tionell wie auch ökologisch wirtschaftenden Betrieben erfasst (Tab. 1).

Tabelle 1: Gesamtzahlen der meist gefangenen Schädlingsarten an allen Monitoringstandorten im Lager und im Freiland

	Gesamtfänge im Lager		
	2023	2024	2025
<i>Ephestia elutella</i>	135	1251	1392
<i>Ephestia kuehniella</i>	298	670	23
<i>Nemapogon granella</i>	323	376	95
<i>Oryzaephilus surinamensis</i>	150	1194	1410
<i>Plodia interpunctella</i>	248	3118	555
<i>Psocoptera spp.</i>	869	1927	2392
<i>Rhyzopertha dominica</i>	164	308	1185
<i>Sitophilus granarius</i>	27	61	44

	Gesamtfänge im Freiland		
	2023	2024	2025
<i>Ephestia elutella</i>	21	82	14
<i>Ephestia kuehniella</i>	12	87	2
<i>Nemapogon granella</i>	4	9	7
<i>Oryzaephilus surinamensis</i>	130	429	2355
<i>Plodia interpunctella</i>	0	55	4
<i>Psocoptera spp.</i>	188	690	79
<i>Rhyzopertha dominica</i>	943	838	1695
<i>Sitophilus granarius</i>	2	44	328

In 2024 und 2025 wurden mit den eingesetzten Fallen jeweils mehr als doppelt so viele Individuen (>7.500 Exemplare) gefangen wie im Jahr 2023. Ein Großteil des Schädlings-spektrums trat im Innenbereich auf. Interessanterweise wurden jedoch einige Arten, insbesondere der wärmeliebende, nicht heimische Getreidekapuziner (*R. dominica*) auf fast allen Betrieben in sehr großer Anzahl im Feld nachgewiesen (Abb. 5). Die Arten *O. surinamensis* (Getreideplattkäfer) und *Sitophilus granarius* (Kornkäfer) wurden im Freiland nur in einzelnen Jahren und an bestimmten Standorten im Freiland erfasst, dort jedoch z.T. in hoher Anzahl (Tab. 1). Die Verhaltenstests im Labor zeigten, dass bestimmte Pheromonkombinationen in Versuchen mit vier *Trogoderma* Arten teilweise einen interferenten Effekt hinsichtlich der Attraktivität haben. Im Gegensatz hierzu zeigte in Versuchen mit *R.dominica* keine

der getesteten Pheromonkombinationen eine abschwächende Wirkung auf die Anlockung.

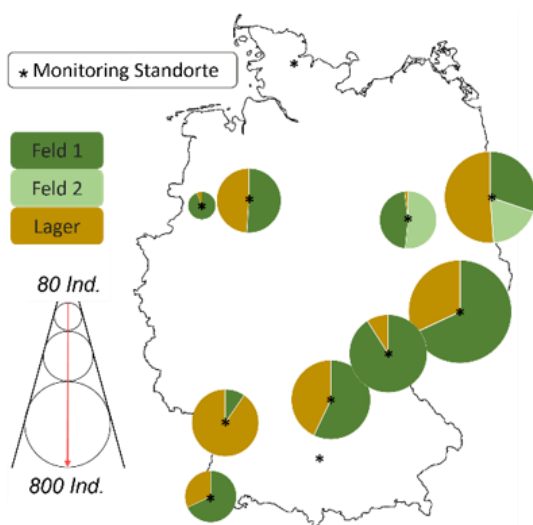


Abbildung 5: Gesamtzahl gefangener Getreidekapuziner *R. dominica* im Lager und Feld von 2023 bis 2025 auf 11 Testbetrieben.

## SCHLUSSFOLGERUNGEN

**Hermetische Lagerung** hat das Potenzial, Verluste in der Getreidelagerung zu vermindern. Getreide in hermetischen Gebinden erfordert jedoch eine Überwachung von Sauerstoffwerten, Temperatur und Feuchte, um eventuelle Undichtigkeiten zu erkennen und darauf reagieren zu können.

Die **ökonomische Bewertung** zeigt, dass hermetische Siloschläuche aufgrund fehlender Baukosten und niedriger variabler Kosten die kostengünstigste Lagertechnik für Körnerschüttgüter darstellen. Zudem bieten sie eine wirksame Anpassungsoption an den Klimawandel, da sie Nachernteverluste und Schädlingsbefall deutlich reduzieren können. Ihre ökonomischen Vorteile sollten jedoch im Kontext sozialer und ökologischer Nachhaltigkeitsaspekte sorgfältig abgewogen werden. Die **ökologische Bewertung** zeigt, dass hermetische Lagerformen das Potenzial haben, Umweltwirkungen der Getreidelagerung erheblich zu senken. Die im Projekt entwickelten Pilotsilos aus GfK und Edelstahl reduzierten im Vergleich zu konventionellen Lagern vor allem Treibhausgas- und Toxizitätswirkungen

deutlich. Trotz modellierter Annahmen zeigen die Resultate das ökologische Verbesserungspotenzial hermetischer Systeme.

Die Ergebnisse der **sozialen Bewertung** zeigen, dass hermetische Lagersysteme Arbeitssicherheit und Gesundheitsschutz verbessern, da sie den Einsatz chemischer Begasungen überflüssig machen und den zeitlichen Kontrollaufwand verringern. Gleichzeitig erfordern sie höhere Qualifikation und Sorgfalt beim Aufbau und Betrieb. Insgesamt weisen sie ein günstigeres soziales Nachhaltigkeitsprofil auf als konventionelle Lagerformen.

Das im Rahmen der **Früherkennung** (Monitoring) in Deutschland zum ersten Mal beobachtete weit verbreitete Auftreten von *R. dominica* (Getreidekapuziner) im Freiland weist darauf hin, dass sich die klimatischen Bedingungen und dadurch die Überlebenschancen für (nicht-heimische) vorratsschädliche Insekten(arten) im Freiland verbessert haben. Die Ergebnisse der Verhaltenstests zeigten, dass die Kombination verschiedener Pheromone in einer Falle die Fangeffizienz einzelner Arten verringern kann. Dieser Effekt könnte Resultate von Monitoringprogrammen verfälschen und muss in der praktischen Anwendung berücksichtigt werden.

## AUSGEWÄHLTE VERÖFFENTLICHUNGEN

- Büchner, J., Saltzman, J., (2025): Datensatz: Kosten der Getreidelagerung in Deutschland. doi. 10.5073/20251029-163644
- Fürstenau B, Albrecht C, Adler C, Müller-Blenkle C (2024): Methoden zur Früherkennung vorratsschädlicher Insekten – Schädlinge im Lager und Feld. Der Pflanzenarzt 77, 20–22. [https://www.openagrar.de/receive/openagrar\\_mods\\_00097023](https://www.openagrar.de/receive/openagrar_mods_00097023)
- Müller-Blenkle C, Adler CS (2024): Increasing the Oxygen Consumption in Hermetic Grain Storage Using Grain Weevils (*Sitophilus granarius*) Insects Vol. 15 Issue 11 Pages 845. doi. 10.3390/insects15110845

## HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN FÜR POLITIK UND PRAXIS

Wir empfehlen den Bau gasdichter Läger. Um die sichere **hermetische Lagerung** in der Praxis weiter zu etablieren wäre kostengünstige Technik zur kabelfreien Sauerstoffmessung von großer Bedeutung. Ein Umbau von vorhandenen GfK-Silos zu hermetischen Silos wäre ein Weg, mit geringen Kosten eine hermetische dauerhafte Lagerung zu ermöglichen. Viele Lagerhalter besitzen geeignete GfK-Silos, sind sich der Potenziale aufgrund fehlender Information zur hermetischen Getreidelagerung aber nicht bewusst. Fortbildungsmaßnahmen zur hermetischen Lagerung wären hier sinnvoll.

Um die **Früherkennung** vorratsschädlicher Insekten im Lager und vor allem auf dem Feld zu verbessern (und somit rechtzeitig geeignete Gegenmaßnahmen zu ermöglichen/durchführen zu können), wird der Ausbau eines deutschlandweiten Monitorings empfohlen. Dabei sollten bestehende Monitoringstrukturen eingebunden und die Nutzung innovativer Methoden (molekular/digital) sowie der Informationsaustausch zwischen Forschung und Praxis gestärkt werden.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Landwirtschaft, Ernährung  
und Heimat

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

### Bewertung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks der deutschen Weinproduktion zur Erschließung zusätzlicher Klimaschutzpotenziale im Weinbau

Nina Minges, Iven Schlich, Oliver Trapp und Til Feike

#### ZIELSETZUNG

Im Rahmen des CaberNET-Projekts wurde der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der deutschen Weinproduktion, für alle Produktionsschritte bis zum Werkstor der Weingüter, untersucht und bewertet, um Optimierungspotenziale im Hinblick auf den Klimaschutz zu identifizieren. Es wurden Faktoren zur Verringerung der Treibhausgas (THG)-Emissionen ermittelt und evaluiert. Außerdem wurden Handlungsempfehlungen für die Weinbaupraxis bereitgestellt. Neben den THG-Emissionen wurden weitere Umweltwirkungskategorien betrachtet.

Aufbauend auf den Ergebnissen wurde mit Hilfe einer Konsumentenbefragung die Akzeptanz für ein Mehrwegsystem bei Weinflaschen in Deutschland und den zur Kaufentscheidung beitragenden Produktmerkmalen und Einflussfaktoren untersucht.

#### METHODIK

Mittels Lebenszyklusanalyse (life cycle assessment; LCA) wurden die THG-Emissionen entlang der Weinproduktionskette quantifiziert, wobei vier Hauptproduktionsschritte betrachtet wurden: i) Neuanlage eines Weinbergs, ii) Traubenproduktion, iii) Weinproduktion und iv) Abfüllung.; rechnerisch wurden die Schritte i) und ii) zusammengefasst. Hinsichtlich der LCA-Systemgrenzen, wurde eine partielle LCA durchgeführt, die sich von „cradle to gate“ erstreckt und die Produktionsschritte Vertrieb, Konsum und Recycling nicht berücksichtigte.

Zur Beschreibung des Status quo der THG-Emissionen im Weinbau und Identifikation von geeigneten THG-Minderungspotenzialen wurde die 0,75 l Flasche Wein als funktionelle Einheit genutzt.

In Face-to-Face Interviews wurden detaillierte Daten von 91 Weingütern und Genossenschaften aus verschiedenen deutschen Anbaugebieten erhoben (Abb. 1). Die Daten bezogen sich auf das Produktionsjahr 2022 und umfassten alle Informationen von der Etablierung des Weinbergs über die Stoff- und Energieflüsse im betriebsspezifischen Produktionssystem bis hin zur verkaufsfertigen Flasche Wein. Im Hinblick auf die anschließende LCA wurden die Wirkungsdaten für die stofflichen und energetischen Inputs aus Ecoinvent und weiteren Quellen zusammengetragen.

Der standardisierte Fragebogen der Konsumentenumfrage zur Akzeptanz von Mehrwegflaschen wurde mit dem Online-Tool LimeSurvey entwickelt und durch einen deutschen Online-Panel-Anbieter an rund 1000 Teilnehmer\*innen verteilt.

Mittels unterschiedlicher Quoten (Alter, Geschlecht, Wohnort) wurde die Repräsentativität der Stichprobe gesteuert und an die deutsche Bevölkerung angepasst.

#### HIGHLIGHTS

- Umfassende Klimabilanzierung des deutschen Weinbaus mit 92 Teilnehmerbetrieben
- Haupteinflussfaktoren auf den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck einer Weinflasche sind: Dieselverbrauch, Drahtgerüst des Weinbergs, Glasflasche
- Kein negativer Einfluss auf die Kaufentscheidung festgestellt, falls Wein in Pfandflaschen verkauft wird.

Zur Erfassung der Akzeptanz und Umwelteinstellung der Konsumenten wurden etablierte Skalen eingesetzt. Die Kaufbereitschaft und Zahlungsbereitschaft für verschiedene Weinflaschen wurde mittels Discrete Choice Experiment gemessen. Hierfür wurden verschiedene Attribute wie Herkunft, Preis, Pfandlabel, und Zertifizierung in unterschiedlichen hypothetischen Etiketten kombiniert und den Befragten zur Kaufentscheidung vorgelegt.

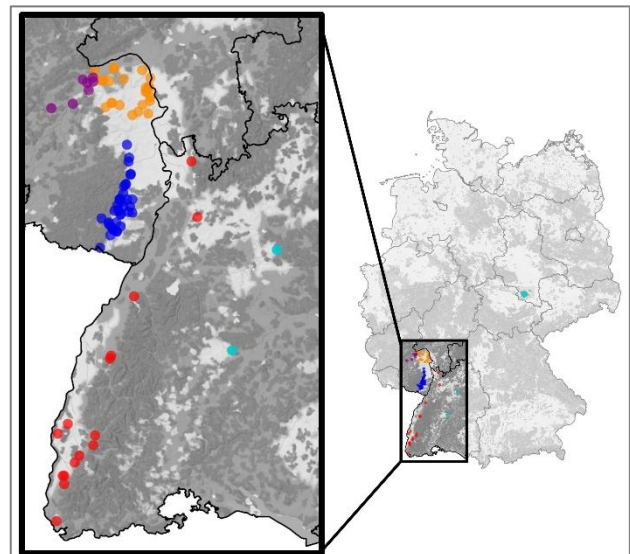


Abbildung 1: Übersicht der 84 Weingüter (ohne Genossenschaften) aus Rheinhessen (gelb), der Pfalz (blau), Baden (rot), von der Nahe (violett) und sonstiger Anbaugebiete (türkis); (Kartendaten © Stadia Maps (stadia.com), Stamen Design (stamen.com), OpenStreetMap (openstreetmap.org/copyright)).

#### ERGEBNISSE

In der Umweltwirkungskategorie Klimawandel liegen die durchschnittlichen Emissionen für eine 0,75 l Flasche Wein bei 1,13 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalenten (Äq).

Für konventionell wirtschaftende Betriebe liegt der Mittelwert bei 1,19 kg CO<sub>2</sub>-Äq und für ökologische wirtschaftende Betriebe bei 1,06 kg CO<sub>2</sub>-Äq (Tab. 1). Es wurden jedoch keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Bewirtschaftungsformen festgestellt.

Die prozentuale Verteilung der unterschiedlichen Produktionsfaktoren für die Umweltwirkungskategorie

## KLIMAWIRKUNG

Durch die Verwendung von Mehrwegflaschen für deutschen Wein, könnten bereits bei 8 Wiederverwendungen der Glasflasche etwa 30 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen einer Flasche Wein eingespart werden. Deutschlandweit könnten hierdurch schätzungsweise 344.000 t CO<sub>2</sub>-Äq pro Jahr eingespart werden.

Darüber hinaus können weinbauliche Maßnahmen zusätzliche Reduktionspotenziale erschließen. Eine optimierte Materialwahl des Drahtgerüsts, etwa durch den ausschließlichen Einsatz von Hartholzpfehlen, ermöglicht Einsparungen von rund 20 % in der deutschlandweiten Traubenproduktion, dies entspricht ca. 38.500 t CO<sub>2</sub>-Äq pro Jahr.

Ebenso weist der ausschließliche Anbau von pilzwiderstandsfähigen (PIWI-) Rebsorten ein Reduktionspotenzial von rund 16 % für die Traubenproduktion in Deutschland auf. Hierdurch könnte die Häufigkeit von Pflanzenschutzmittelanwendungen reduziert werden, was Emissionen aus Kraftstoffverbrauch und Pflanzenschutzmittelherstellung reduzieren würde. Damit könnten rund 30.600 t CO<sub>2</sub>-Äq pro Jahr eingespart werden.

Klimawandel zwischen den Bewirtschaftungsformen zeigt geringfügige, nicht signifikante, Unterschiede (Abb. 2). In konventionellen Betrieben tragen die Produktionsfaktoren „Diesel“ und „Brennstoff“ etwas stärker zum CO<sub>2</sub>-Fußabdruck bei. Bei ökologischen Betrieben fällt deren Anteil dagegen geringer aus, wodurch der relative Beitrag der Glasflasche zunimmt. Außerdem zeigt sich, dass die Glasflasche unabhängig von der Bewirtschaftungsform mindestens 43 % zum CO<sub>2</sub>-Fußabdruck einer Flasche Wein beiträgt und der Dieselverbrauch mit mindestens 16 % die zweitwichtigste Einflussgröße ist.

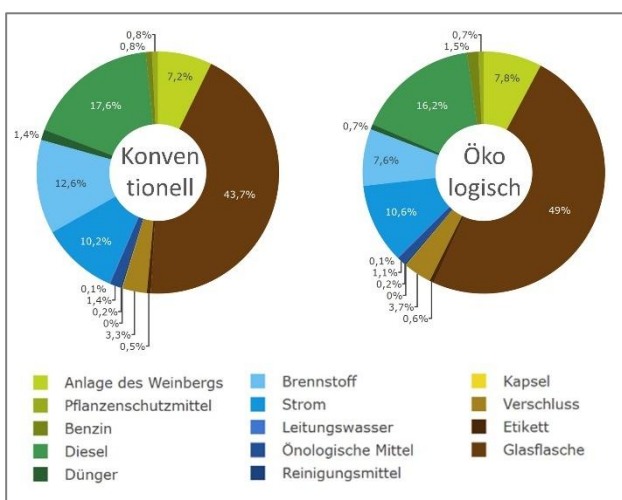


Abbildung 2: Prozentuale Anteile der verschiedenen THG-Emissionsquellen der konventionellen vs. ökologischen Produktion einer 0,75 l Weinflasche basierend auf den Befragungsdaten.

In Abbildung 3 sind die prozentualen Verteilungen der unterschiedlichen Produktionsfaktoren in weiteren Umweltwirkungskategorien dargestellt. Die Grafik zeigt, dass die Glasflasche den größten Einfluss in den meisten

Umweltwirkungskategorien hat. Hinsichtlich der Umweltwirkungskategorien Süßwasserökotoxizität und Ozonabbau konnten signifikante Unterschiede zwischen den beiden Bewirtschaftungsformen ökologisch und konventionell festgestellt werden. Verursacht werden diese Unterschiede vorrangig durch die Verwendung unterschiedlicher Pflanzenschutzmittel. So verursacht die Produktion konventioneller Pflanzenschutzmittel höhere Emissionen, die den Ozonabbau negativ beeinflussen. Wohingegen die Produktion von kupferhaltigen Pflanzenschutzmitteln, welche vermehrt in ökologischen Betrieben eingesetzt werden, einen höheren Einfluss auf die Süßwasserökotoxizität hat.

Weder die verschiedenen Anbauggebiete noch die Größe der bewirtschafteten Rebfläche hatten seinen signifikanten Einfluss auf die Umweltwirkung.

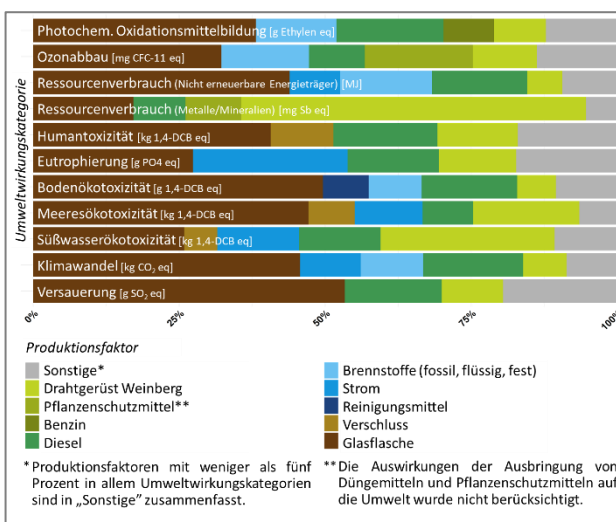


Abbildung 3: Prozentuale Anteile der verschiedenen Produktionsfaktoren in den Umweltwirkungskategorien für 0,75 l Weinflasche.

Für die sieben Winzergenossenschaften wurde ein durchschnittlicher CO<sub>2</sub>-Fußabdruck von 1,33 kg CO<sub>2</sub>-Äq je Weinflasche errechnet, wobei der Median bei 0,94 kg CO<sub>2</sub>-Äq liegt. Die Anteile der verschiedenen Produktionsfaktoren entsprechen weitgehend denen der Weingüter, unterscheiden sich jedoch durch einen erhöhten Einsatz ökologischer Behandlungsmittel.

Alle teilnehmenden Weinbaubetriebe und Genossenschaften erhielten eine individuelle Auswertung. Diese enthielt neben den betriebsspezifischen Ergebnissen auch aggregierte Vergleichsdaten. Darüber hinaus wurden mögliche Stellschrauben hinsichtlich der THG-Einsparungspotenziale sowie die Grenzen der Studie aufgezeigt und diskutiert.

Im Rahmen der Konsumentenumfrage wurde herausgefunden, dass bei der Mehrheit der Befragten eine hohe Akzeptanz für eine Pfand-Mehrwegflasche besteht. Diese Bereitschaft spiegelt sich ebenfalls in dem gemessenen Umweltbewusstsein der Befragten wider.



Tabelle 1: THG-Emissionen einzelner Produktionsschritte für alle Betriebe, konventionelle Betriebe und ökologische Betriebe

kg CO <sub>2</sub> eq je Flasche Wein (n = 84; alle)				
Produktionsschritt	Mittelwert	Median	Min	Max
Traubenproduktion	0,31	0,24	0,09	1,73
Weinproduktion	0,26	0,14	0,03	2,97
Abfüllung	0,56	0,57	0,53	0,57
Gesamt	1,13	0,97	0,72	4,07

kg CO <sub>2</sub> eq je Flasche Wein (n = 50; konventionell)				
Produktionsschritt	Mittelwert	Median	Min	Max
Traubenproduktion	0,33	0,23	0,12	1,73
Weinproduktion	0,29	0,14	0,03	2,97
Abfüllung	0,56	0,57	0,53	0,57
Gesamt	1,19	0,95	0,72	4,07

kg CO <sub>2</sub> eq je Flasche Wein (n = 34; ökologisch)				
Produktionsschritt	Mittelwert	Median	Min	Max
Traubenproduktion	0,29	0,24	0,09	1,11
Weinproduktion	0,21	0,14	0,03	0,87
Abfüllung	0,57	0,57	0,53	0,57
Gesamt	1,06	0,99	0,80	2,55

Durch das Discrete Choice Experiment wurden weitere Eigenschaften und Angaben auf dem Etikett identifiziert, die sich signifikant auf die Kaufbereitschaft einer Weinflasche auswirken. Der Preis, die ökologische Zertifizierung sowie die auf dem Etikett vermerkte Herkunft des Weins hatten einen signifikanten Effekt auf die Kaufbereitschaft. Ein höherer Preis oder importierter Wein verringerten die Kaufbereitschaft der Konsumenten, wohingegen eine Bio-Zertifizierung diese signifikant erhöhte. Dagegen konnte weder für das Vorhandensein eines Pfandsymbols noch für die Höhe des im Experiment getesteten Pfands von 0,15 € vs. 0,25 €, ein signifikanter Effekt auf die Kaufentscheidung für Wein nachgewiesen werden.

## SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Umweltwirkung einer Flasche Wein wird maßgeblich von der Einweg-Glasflasche bestimmt und kann durch den Einsatz von Leichtglas- oder Mehrwegflaschen deutlich reduziert werden.

Die Analyse der einzelnen Produktionsschritte zeigte, dass bei der Traubenproduktion der Dieselverbrauch sowie das zur Errichtung des Drahtgerüsts im Weinberg eingesetzte Material die wesentlichen Emissionsquellen darstellen. Potenziale zur Emissionsminderung ergeben sich insbesondere durch eine gezielte Materialwahl bei der Neuanlage des Weinbergs. Vor allem imprägnierte Weichholzpfähle weisen im Vergleich zu Stahl- oder Hartholzpfählen einen negativeren Umwelteinfluss auf. Darüber hinaus ist die Standzeit, und damit die Lebensdauer der eingesetzten Materialien, von zentraler Bedeutung: Mit zunehmender

Nutzungsdauer des Weinbergs reduzieren sich die materialbedingten Emissionen.

Der Dieselverbrauch kann durch eine Verringerung der Anzahl an Überfahrten mit dem Traktor reduziert werden, beispielsweise durch den Anbau von PIWI-Rebsorten mit geringerem Pflanzenschutzapplikationsbedarf oder durch die effiziente Kombination maschineller Arbeitsschritte.

Innerhalb der Weinproduktion fallen vor allem der Stromverbrauch zur Temperaturregulierung während der Gärung sowie die Brennstoffe für Heizung und Heißwasser ins Gewicht. Jedoch ist die Umweltwirkung der Weinproduktion im Vergleich zu den anderen Produktionsschritten eher gering.

Ein weiterer Aspekt in der Bilanzierung der Traubenproduktion ist das Ertragsniveau. Es stellt die Bezugsgröße für alle eingesetzten Betriebsmittel und Produktionsfaktoren dar. Sinkt der Ertrag bei gleichbleibendem Mitteleinsatz, etwa infolge ungünstiger Witterung oder Hagelschäden, verschlechtert dies die Ergebnisse der Klimabilanz.

Die Ergebnisse der Konsumentenanalyse verdeutlichen, dass sich deren Kaufbereitschaft durch die Nutzung von Mehrwegflaschen nicht verringert, diese jedoch signifikant von Herkunft, Zertifizierung und Preis beeinflusst wird. Diese Erkenntnisse mildern bestehende Bedenken hinsichtlich eines möglichen Flaschenpfands und unterstreichen die Relevanz, gezielte Marketingstrategien für nachhaltige Verpackungssysteme im Weinsektor zu fördern.

Im Rahmen von CaberNET wurden erstmals in diesem Umfang Klimabilanzierungen für den deutschen Weinbau durchgeführt. Dies ermöglichte es, CO<sub>2</sub>-Einsparpotenziale im Weinbau zu identifizieren und Handlungsempfehlungen abzuleiten. Durch die den Teilnehmerbetrieben bereitgestellten Abschlussberichte mit konkreten Handlungsempfehlungen sowie die Veröffentlichungen in deutschsprachigen Fachzeitschriften, wurde die Weinbaupraxis zu klimaschonendem und nachhaltigem Wirtschaften im Weinbau informiert.

## AUSGEWÄHLTE VERÖFFENTLICHUNGEN

- Minges et al. (2025): Praxis trifft Klimaschutz: CO<sub>2</sub>-Optimierung im Weinbau; Außerdem im Fokus: Die Akzeptanz von Mehrweg-Glasflaschen für Wein. Das Deutsche Weinmagazin. (akzeptiert)
- Schlich et al. (2025): The environmental impact of wine grape production: A life cycle assessment study of 84 wineries in Germany. (in preparation)

## HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN FÜR POLITIK UND PRAXIS

- Einführung und Etablierung eines deutschlandweiten Mehrwegsystems für Weinflaschen
- Förderung des Anbaus der PIWI-Rebsorten zur Einsparung von Pflanzenschutzmittel und Kraftstoff (insbesondere Diesel)
- Vermeidung imprägnierter Weichholzpfähle bei der Erstellung der Drahtgerüsts eines Weinbergs, Hartholz- oder Stahlpfähle bevorzugen

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Klimagerechte Ernährung aus der Perspektive von Verbrauchern und Gesellschaft

Carmen Priefer, Felix Bröcker, Sarah Kohane und Sonja Kollmann (Max-Rubner-Institut);  
Nina Di Guida, Franziska Mathias und Inken Christoph-Schulz (Thünen-Institut)

Das Verbundvorhaben „ENKL“ untergliedert sich in zwei Teilprojekte und beschäftigt sich mit der sozialen Dimension einer klimafreundlichen und nachhaltigen Ernährung sowie mit der Förderung einer klimafreundlichen Ernährung im Alltag von Verbraucher\*innen. Das übergeordnete Ziel ist, Veränderungsprozesse im Ernährungsbereich hin zu mehr Nachhaltigkeit zu unterstützen, um Treibhausgasemissionen zu reduzieren.

### ZIELSETZUNG

#### Soziale Dimension

Um zu mehr Klimaschutz und -gerechtigkeit beizutragen, muss Ernährung nachhaltiger und damit auch sozialverträglicher gestaltet werden. Während die ökologische Dimension zunehmend erforscht und Umweltauswirkungen zumeist gut erfassbar sind, ist die soziale Dimension nachhaltiger Ernährung noch unterrepräsentiert. Ziele waren die partizipative Aufarbeitung des Wissensstands sowie die Identifikation von Ansatzpunkten zur Stärkung der Thematik. Folgende Forschungsfragen wurden im Projekt behandelt:

- 1: Wie kann die soziale Dimension nachhaltiger Ernährung konzeptionell gefasst werden?
- 2: Welche Themen werden unter sozialer Nachhaltigkeit in den beiden Forschungsfeldern *Lebensmittelproduktion* und *Lebensmittelverbrauch* diskutiert?
- 3: Welche aktuellen Entwicklungen (z. B. Forschungsvorhaben, Indikatoren und Berichte) gibt es und wer sind relevante Akteur\*innen?
- 4: Welche Handlungsfelder bestehen für Politik und Wissenschaft, um die soziale Dimension stärker zu fördern und berücksichtigen?

#### Klimagerecht essen

Die weltweite Lebensmittelproduktion trägt wesentlich zum Überschreiten der planetaren Grenzen bei und ist für rund ein Drittel der globalen THG-Emissionen verantwortlich (Rockström et al., 2025). Für Deutschland zeigt sich, dass das Ernährungssystem etwa 25 % der nationalen THG-Emissionen verursacht (WBAE 2020, S. 357). Wichtige Treiber sind tierische Produkte, vor allem Fleisch, sodass eine Reduktion des Fleischverzehr negative Klimafolgen maßgeblich reduzieren könnte (ebd.). Weiteres Einsparpotenzial besteht durch die Vermeidung von Lebensmittelabfällen sowie durch den bevorzugten Verzehr saisonaler und regionaler Lebensmittel.

Ein wesentlicher Einfluss kommt den Verbraucher\*innen insofern zu, als sie durch ihr Ernährungsverhalten das Lebensmittelangebot mitbestimmen. Darüber hinaus verursachen viele von ihnen weitere vermeidbare THG-Emissionen durch Lebensmittelabfälle, die Nutzung des Autos beim Einkauf oder den Kauf von (in Plastik) verpackten

### HIGHLIGHTS

- Session „Klimagerechte Ernährung und die besondere Rolle von Klimabeln“ auf der DAFA-Konferenz „Agrarforschung zum Klimawandel“ 2024 in Potsdam
- Zwei abgeschlossene Masterarbeiten, eine davon mit Vergleich zwischen Landwirt\*innen und Verbraucher\*innen zu klimafreundlicher Ernährung
- DGE-Posterpreis 2023 „Sozialverträgliche Gestaltung der Ernährung“ beim DGE-Kongress 2023 in Bonn

Lebensmitteln. Durch ein klimafreundlicheres Ernährungsverhalten können sie daher maßgeblich zur Eindämmung des Klimawandels und zur Erreichung der Klimaziele beitragen. Vor diesem Hintergrund wurden folgende Fragen untersucht:

- 1: Was motiviert Verbraucher\*innen für eine klimafreundliche Ernährung?
- 2: Welche Aspekte einer klimafreundlichen Ernährung sind aus Sicht von Verbraucher\*innen gut umsetzbar?
- 3: Welche Schwierigkeiten haben sie bei der Umsetzung eines klimafreundlichen Ernährungsverhaltens?
- 4: Welche Hilfestellungen wünschen sie sich?

### METHODIK

#### Soziale Dimension

Zur Beantwortung der Forschungsfragen kam ein Methodenmix zum Einsatz, der quantitative und qualitative Ansätze verbindet. Mithilfe von **Mentimeter-Abfragen** in Vorträgen und Veranstaltungen (z. B. im Rahmen eines DAFA-Webinars) wurden individuelle Verständnisse und thematische Assoziationen für soziale Nachhaltigkeit in den beiden Forschungsfeldern erfragt.

Zur systematischen Erfassung relevanter Akteur\*innen und aktueller Forschungsvorhaben wurde eine umfassende **Online-Recherche** durchgeführt. Darauf aufbauend wurde eine Netzwerktabelle erstellt, die kontinuierlich durch die Teilnahme an Veranstaltungen sowie Hinweise bestehender Kontakte erweitert wurde. Auf dieser Grundlage wurden **34 Interviews** (teils mit Screening-Charakter) mit Expert\*innen aus Wissenschaft, Zivilgesellschaft, Wirtschaft und Politik geführt. Hauptthemen waren die konzeptionellen Arbeiten im Projekt (FF 1) und die Themenübersicht (FF 2). Parallel dazu wurden **zwei Workshops** durchgeführt, in denen jeweils rund 15 Expert\*innen zentrale Fragestellungen zu den Forschungsfeldern diskutierten (Abb. 1).

Im Rahmen einer **narrativen Literaturrecherche** wurden Konzepte zu sozialer Nachhaltigkeit analysiert. Die Erkenntnisse wurden in ein eigenes Schema überführt, das die Kernelemente der sozialen Dimension beschreibt. Des Weiteren wurde eine **systematische Literaturrecherche** zur

## KLIMAWIRKUNG

Das Ernährungssystem hat national mit ca. 25 % einen erheblichen Anteil an den Treibhausgas (THG)-Emissionen und es bestehen in verschiedenen Bereichen relevante Reduktionspotenziale. Ob dieses Potenzial realisiert werden kann, hängt von Veränderungen im Ernährungsverhalten und in unseren Agrar- und Ernährungssystemen ab, welche Jahrzehnte in Anspruch nehmen werden. Die Berücksichtigung von sozialen Aspekten, ebenso wie von Hürden in den Ernährungsumgebungen von Verbraucher\*innen, sind zentrale Faktoren für das Gelingen gesellschaftlicher Transformation im Ernährungsbereich und die Wirksamkeit von Klimaschutzmaßnahmen. Das Projekt weist damit ein theoretisches THG-Minderungspotenzial auf.

Identifikation von Schlüsselthemen durchgeführt. Sie enthält deutsch- und englischsprachige Literatur aus wissenschaftlichen Zeitschriften sowie graue Literatur. Zur Strukturierung der identifizierten Themenfelder wurden **Mindmaps** erstellt (s. Abb. 2+3). Diese wurden im Rahmen interner Austausche mit weiteren Fachdisziplinen kritisch reflektiert, um fehlende Themen zu identifizieren. Auch Hinweise aus Workshops und Interviews wurden aufgenommen. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Zuordnung der eingesetzten Methoden.

Tabelle 1: Zuordnung der verwendeten Methoden zu den Forschungsfragen

Methode \ Forschungsfrage	1	2	3	4
Expert*innen-Workshop				
Interview/Screening-Gespräch				
Mentimeter-Abfrage				
Narrative Literaturrecherche				
Online-Recherche				
Systematische Literaturrecherche				

## Klimagerecht essen

Zunächst wurden acht **Expert\*innen-Interviews** durchgeführt, um herauszufinden, wie eine klimafreundliche Ernährung durch Verbraucher\*innen umgesetzt werden kann und welche Strategien dafür erforderlich sind. Im November 2023 wurden darauf aufbauend 77 **Interviews mit Verbraucher\*innen** aus den Städten Hamburg, Leipzig, München und Köln geführt. Im Fokus der Interviews standen u. a. die Themen Verständnis und Umsetzung einer klimafreundlichen Ernährung sowie Identifizierung und Verfügbarkeit klimafreundlicher Produkte.

Aufbauend auf den Interviews wurden zwischen Januar und Februar 2024 acht leitfadengestützte **Gruppendiskussionen** mit denselben Verbraucher\*innen (n=56) durchgeführt. Diskutiert wurde u. a. wie die Umsetzung einer klimafreundlichen Ernährung im Alltag möglich ist sowie eventuelle Schwierigkeiten dabei. Ferner wurden den Teilnehmenden Empfehlungen für eine klimafreundliche Ernährung vorgestellt. Diese beinhalteten, mehr pflanzliche und dafür weniger tierische Produkte zu verzehren, Lebensmittelabfälle zu mindern, saisonal, regional und bevorzugt Bio-Lebensmittel einzukaufen, Verpackungen zu vermeiden und für den Einkauf auf das Auto zu verzichten. Im Anschluss an

die Gruppendiskussionen folgte im Februar und März 2024 eine Praxisphase. Die Teilnehmer\*innen der Gruppendiskussionen sollten sich über einen Zeitraum von drei Wochen klimafreundlich ernähren und verhalten. Dabei ging es darum, die vorgestellten Empfehlungen entsprechend den persönlichen Möglichkeiten (Zeit, finanzielle Mittel etc.) umzusetzen.

Nach dieser Umsetzungsphase wurden im April 2024 nochmals acht Gruppendiskussionen mit den beteiligten Verbraucher\*innen durchgeführt. Der Schwerpunkt lag auf der Diskussion der Praxisphase.

Abschließend wurde basierend auf den Ergebnissen der qualitativen Studien im September/Oktober 2025 eine deutschlandweite **Online-Befragung** mit Verbraucher\*innen (n=1500) durchgeführt, um die Ergebnisse zu verifizieren.

## ERGEBNISSE

### Soziale Dimension

Wesentliche Bausteine des Konzepts sind die Unterteilung in substanzielle (inhaltsbezogene) und prozedurale (prozessbezogene) soziale Nachhaltigkeit, sowie die Festlegung von zwei inhaltlichen Hauptkategorien: Soziale *Gerechtigkeit* sowie Sozialer *Zusammenhalt und gesellschaftliche Entwicklung*. Soziale Gerechtigkeit ist sozioökonomisch geprägt und bezieht sich auf Mindestbedingungen, die einem Individuum zustehen sollten, z. B. in Bezug auf Zugangs- und Verteilungsgerechtigkeit oder Arbeitsbedingungen. Sozialer *Zusammenhalt und gesellschaftliche Entwicklung* bezieht sich auf das Miteinander in der Gesellschaft sowie kulturelle Vielfalt und ist soziokulturell ausgerichtet.

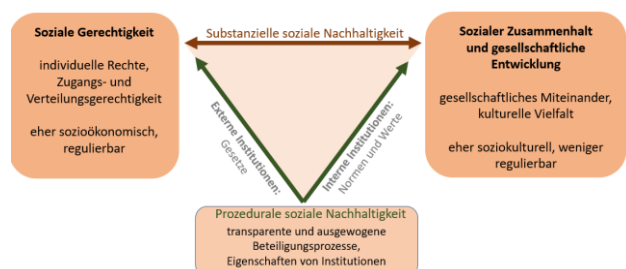
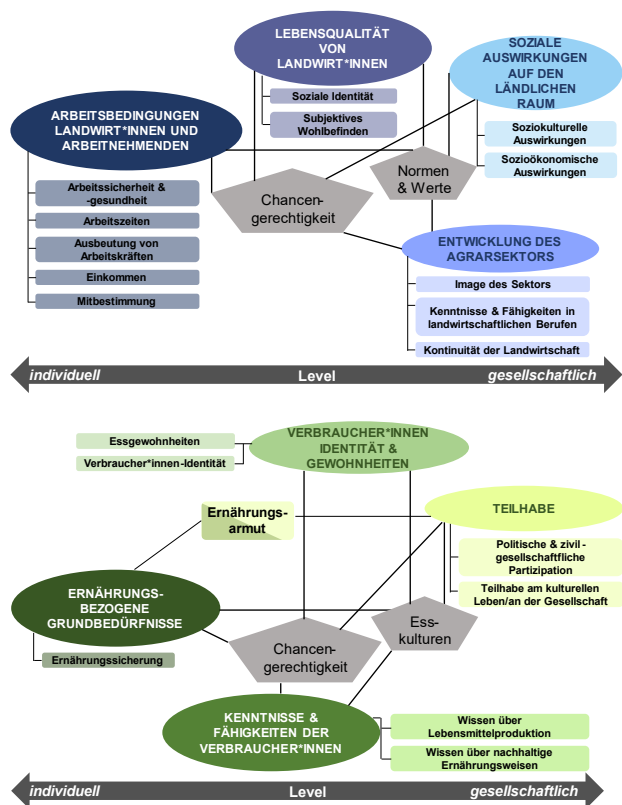


Abbildung 1: Schema der sozialen Dimension nachhaltiger Ernährung (in Bearbeitung).

Entlang der Lebensmittelwertschöpfungskette gibt es je nach Stufe, Disziplin und geografischem Kontext unterschiedliche Perspektiven auf soziale Nachhaltigkeit. In der Lebensmittelproduktion wurden die Themen *Arbeitsbedingungen von Landwirt\*innen und Arbeitnehmenden, Lebensqualität von Landwirt\*innen, Entwicklung des Agrarsektors und soziale Auswirkungen auf den ländlichen Raum* identifiziert. Die Themen *ernährungsbezogene Grundbedürfnisse, Kenntnisse und Fähigkeiten der Verbraucher\*innen, Identität und Gewohnheiten sowie Teilhabe* bestimmten den Diskurs im Bereich Lebensmittelverbrauch.



Abbildungen 2 und 3: Themen sozialer Nachhaltigkeit in der Lebensmittelproduktion (Blau) sowie im Lebensmittelverbrauch (Grün).

Im Projekt wurden 270 Einzelpersonen, 125 Institutionen, 50 Netzwerke und 35 Projekte aus dem deutschsprachigen Raum identifiziert, die sich zumindest im erweiterten Sinne mit Aspekten sozialer Nachhaltigkeit in der Lebensmittelwertschöpfungskette befassen. Hervorzuheben ist hierbei, dass bislang kaum zielgerichtete Forschung zur Gänge der sozialen Dimension durchgeführt wurde und sich die genannten Personen und Netzwerke eher mit Einzelaspekten wie Regionalität, Ernährungsarmut oder Gemeinschaftsverpflegung beschäftigen. Beim Screening der deutschsprachigen Berichterstattung wurde deutlich, dass soziale Aspekte zu Ernährung und Landwirtschaft meist nur am Rande thematisiert werden, wobei die Produktionsseite im Vergleich zur Verbrauchsseite noch seltener im Fokus steht. Ein ähnliches Bild zeigt sich bei der Betrachtung der Lebensmittelsiegel auf dem deutschsprachigen Markt. Diese greifen Soziales nur begrenzt auf, häufig steht das Thema Tierwohl im Fokus. Einige Label aus dem Fairtrade-Bereich adressieren gezielt Produktionsbedingungen in der Landwirtschaft, häufig beschränkt auf spezifische Produktgruppen.

### Klimagerecht essen

Da sich im Laufe des Projektes zeigte, dass VerbraucherInnen oft nicht wissen, was unter „klimagerecht“ zu verstehen ist, sehr wohl aber eine Vorstellung haben, was „klimafreundlich“ bedeutet, wurde diese Begrifflichkeit im Verlauf des Projektes anstelle des „klimagerecht“ eingeführt.

Verbraucher\*innen motivieren insbesondere persönliche Gründe, wie die eigene Gesundheit oder die Möglichkeit, einen Beitrag zum Umweltschutz bzw. Allgemeinwohl zu leisten, aber auch die Verantwortung gegenüber der nächsten Generation. Die Online-Befragung bestätigte diese Ergebnisse weitestgehend, wobei hier als zweitwichtigster

Motivator (17 %) das höhere Tierwohl genannt wurde. Das Klima per se reicht dagegen nur selten als Motivation.

Die Praxisphase hat gezeigt, dass am häufigsten die Reduktion von Lebensmittelabfällen (70 % der Teilnehmer\*innen) und der Verzicht auf das Auto umgesetzt werden konnte (63 %). Jeweils ca. ein Drittel gab an, mehr pflanzliche Produkte gegessen und tierische Produkte reduziert zu haben. Nur ca. 18 % haben Verpackungen vermieden. Die Online-Befragung lieferte ähnliche Ergebnisse: Die meisten Teilnehmer\*innen gaben auf die Frage, welche Empfehlungen sie bereits umsetzen an, dass sie immer oder meistens vermeiden, Lebensmittel wegzuerwerfen (71 %), gefolgt vom Einkauf saisonaler (57 %) und regionaler (56 %) Lebensmittel. Am wenigsten werden Bio-Lebensmittel eingekauft (31 %).

Die größte Schwierigkeit nahmen VerbraucherInnen beim Vermeiden von Verpackungen wahr, denn gerade in Supermärkten und Discountern würden viele Lebensmittel nur verpackt angeboten, bzw. seien lose Alternativen häufig teurer. Viele Personen empfinden klimafreundliche Ernährung als allgemein zu teuer und aufwendig. Schwer fällt ferner der Verzicht auf tierische Produkte, teilweise der Verzicht auf das Auto und der Kauf regionaler und ökologischer Produkte aufgrund der teilweise mangelnden Verfügbarkeit. Auch eigenes fehlendes Bewusstsein und Schwierigkeiten, das eigene Verhalten und die Gewohnheiten zu ändern, wurden genannt.

Gewünschte Hilfestellungen sind insbesondere Informationen, mehr Aufklärung, aber auch allgemein ein stärkeres Bewusstsein für das Thema klimafreundliche Ernährung. Teilweise scheint unklar zu sein, dass die Ernährung große Auswirkungen auf den Klimawandel hat. Ein Ampelsystem oder QR-Codes könnten z. B. zur Verbraucher\*innen-Information genutzt werden. Außerdem würden gesetzliche Rahmenbedingungen in Form von Ge- und Verboten helfen, welche z. B. Produzent\*innen und den Lebensmitteleinzelhandel adressieren, um beispielsweise Verpackungsmaterial zu reduzieren. Als hilfreich bezeichnet wurden ferner angemessene Preise für Lebensmittel und wenn eine klimafreundliche Ernährungsweise mit persönlichen Vorteilen verknüpft ist. Darüber hinaus solle Aufklärung bereits in der Kita/Schule stattfinden, aber auch die Politik solle entsprechende Rahmenbedingungen setzen, um ein klimafreundliches Verhalten zu fördern (z. B. durch Ausbau des ÖPNV). Die Online-Befragung ergab dagegen, dass sich die meisten Verbraucher\*innen als Unterstützung geringere Preise für klimafreundliche Lebensmittel wünschen (39 %) und dass weniger Verpackungsmaterial genutzt würde (34 %). Separat erfasst wurde zudem, was VerbraucherInnen bei der Reduktion von Lebensmittelabfällen helfen kann: Die meisten wünschen sich, dass im Einzelhandel kleinere Verpackungen (32 %) und auch optisch nicht perfektes Obst und Gemüse angeboten würden (30 %).

### SCHLUSSFOLGERUNGEN

#### Soziale Dimension

Soziale Nachhaltigkeit ist ein unterrepräsentiertes Thema in Wissenschaft, Zivilgesellschaft, Wirtschaft und Politik, aber von großer Bedeutung für das Gelingen der Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen. Relevante Themen sind bislang nicht ausreichend integriert und liegen in verschiedenen



Disziplinen und Feldern separiert vor, was ein gemeinsames Verständnis erschwert. Das Projekt hat zur Charakterisierung des Feldes und Strukturierung der Vielfalt an Aspekten und Diskussionsebenen beigetragen. Das erarbeitete Wissen kann Debatten informieren und Verständnis für soziale Aspekte und deren Bedeutung fördern. Durch eine stärkere Berücksichtigung können Transformationsprozesse für Klimaziele so konzipiert werden, dass diese gesellschaftlich tragfähiger und damit langfristig erfolgreich sind.

### Klimagerecht essen

Vielen Verbraucher\*innen fällt es schwer, aus Gewohnheiten auszubrechen und das Ernährungsverhalten zu ändern. Eine Verhaltensänderung muss aber nicht nur gewollt sein, es muss erst einmal das Bewusstsein für die Thematik vorhanden sein. Da egoistische Motive, wie die eigene Gesundheit, für Verbraucher\*innen Priorität haben, kann ihnen klimafreundliche Ernährung durch Betonung persönlicher Vorteile bewusst gemacht werden.

Nicht alle Aspekte eines klimafreundlichen Verhaltens sind jedoch für Verbraucher\*innen (leicht) umsetzbar, da sie nicht oder nur bedingt auf alle Aspekte Einfluss nehmen können. Hierzu zählt z. B. das Vermeiden von Verpackungen oder die Nutzung des ÖPNV zur Einkaufsstätte. Hier müssen andere Akteur\*innen, wie Produzent\*innen, der Handel und die Politik mitwirken. Diese sollten durch entsprechende Rahmenbedingungen und das Schaffen benötigter Infrastruktur Verbraucher\*innen bei der Umsetzung unterstützen. Damit das potenzielle THG-Minderungspotenzial zur Realisierung kommt, bedarf es einer Änderung des Ernährungsverhaltens, unterstützt durch erfolgreiche Verbraucherkommunikation und förderliche Rahmenbedingungen.

### AUSGEWÄHLTE VERÖFFENTLICHUNG

- Bröcker F, Mathias F, Derstappen R, Kohane S, Christoph-Schulz I, & Priefer C (2024): Klimagerechte Ernährung aus der Perspektive von VerbraucherInnen und Gesellschaft. In: Deutsche Agrarforschungsallianz (DAFA) (ed.), Agrarforschung zum Klimawandel, doi. 10.3220/DAFA1713767287000

### Weitere Informationen:



MRI



TI

### HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN FÜR POLITIK UND PRAXIS

#### Soziale Dimension

**Wissen nutzen und vermitteln:** Das erarbeitete Wissen einsetzen, ein breites Begriffsverständnis sozialer Nachhaltigkeit im Ernährungsbereich fördern, in der politischen Arbeit berücksichtigen und reflektieren.

**Kooperation und Partizipation stärken:** Faire Beteiligungsprozesse zur Förderung von Akzeptanz und Verständnis für Transformationsvorhaben im Bereich Klimaschutz unter den relevanten Akteursgruppen etablieren. Den Querschnittscharakter von Nachhaltigkeitszielen in der Politik berücksichtigen.

**Forschung erweitern:** Sozialwissenschaftliche Ernährungsforschung stärker fördern, systemwissenschaftliche und transdisziplinäre Ansätze ausbauen, die Erarbeitung von verbessertem Systemverständnis und Transformationswissen vorantreiben, weitere Stufen der Wertschöpfungskette (z. B. Distribution, Handel, Gastronomie) vertieft untersuchen.

**Monitoring ausbauen:** Durch Entwicklung von Indikatoren und Monitoring für soziale Nachhaltigkeit Handlungsbedarfe und Fortschritte erkennbar machen. Gesetze und Maßnahmen auf soziale Wirkungen prüfen, vorhandene Ansätze weiterentwickeln.

**Sozialverträglichkeit in der Lebensmittelwertschöpfungskette verbessern:** Bestehende Handlungsfelder bearbeiten bzw. entlang der Kette systematisch identifizieren, Maßnahmen entwickeln, umsetzen bzw. erproben, Best-Practice Beispiele nutzen, z. B. in folgenden Feldern: Arbeitsbedingungen und Lebensqualität in der Landwirtschaft, Förderung ländlicher Räume, sozialverträgliche Entwicklung des Agrarsektors, Ernährungssicherung, Ernährungsarmut, Teilhabe, Ernährungsbildung und Esskulturen.

#### Klimagerecht Essen

**Information und Kommunikation:** Verbraucher\*innen sollten Informationen in den Einkaufsstätten und online zur Bedeutung von klimafreundlicher Ernährung und welche Aspekte diese umfasst, bereitgestellt werden. Dabei sollte ihnen aufgezeigt werden, welche Vorteile eine klimafreundliche Ernährung für sie hat, da sie Ernährungsentscheidungen häufig aufgrund egoistischer Motive treffen.

**Rahmenbedingungen und Infrastruktur:** Förderliche Rahmenbedingungen und benötigte Infrastruktur sollten geschaffen werden. Dazu gehört z. B. der Ausbau des ÖPNV, um Verbraucher\*innen zu unterstützen, auf das Auto zu verzichten. Außerdem sollten (weitere) Möglichkeiten zur Reduktion von Verpackungen entwickelt werden, da es Verbraucher\*innen schwerfällt, diese zu vermeiden.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Landwirtschaft, Ernährung  
und Heimat

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## TRIP

01.11.2022–31.10.2025

## Treibhausgas Reduktion durch innovative Züchtungsfortschritte bei alternativen pflanzlichen Proteinquellen

**Thorben Sprink, Yves Sprycha, Anne Zaar, Matthias Herrmann, Nan Ha, Monique Branco-Vieira, Isabella Karpinski, Maximilian Forchert, Dima Sabboura, Til Feike, Frank Hartung und Krishna Pathi (Julius Kühn-Institut); Ferike Thom (Thünen-Institut)**

### ZIELSETZUNG

Die Substitution von Milch- und Fleischprodukten durch heimische pflanzliche Proteine bietet ein großes Klimaschutzpotenzial im Agrar- und Ernährungssektor. Verbesserte Sorten sowie optimierter Anbau und Verarbeitung pflanzlicher Proteine kann dabei helfen, zusätzliche THG-Minderungspotenziale zu erschließen. Daher zielte das Projekt TRIP auf:

- i) die züchterische Verbesserung von Hafer (*Avena sativa*), insbesondere bezüglich Proteingehalt und Pilzresistenz,
- ii) die Entwicklung moderner Genom-Editing-Methoden zur Erweiterung des genetischen Potenzials von Hafer und Lupine (*Lupinus sp.*) sowie zur Reduktion von Allergenen
- iii) die Bewertung und Verbesserung der Klimawirkung vom Anbau bis zum fertigen Hafer- und Lupinenprodukt, und
- iv) die Analyse internationaler Handelsfolgen von Hafer- und Lupinendrinken.

### METHODIK

Das Projekt kombinierte züchterische, molekularbiologische, pflanzenbauliche und sozioökonomische Ansätze, um pflanzliche Proteine als klimaschonende Milch- und Fleischersatzprodukte zu bewerten und zu verbessern.

**Züchtung und Molekularbiologie:** 2022 und 2023 wurde eine Hafer-Mutantenkollektion (1200 Mutanten) bezüglich des Rohproteingehaltes mittels Kjeldahl-Methode kultiviert und analysiert und eine robuste NIR-Methode (Nahinfrarotspektroskopie) entwickelt. Anschließend wurden die besten Linien zweistufig auf agronomische Eignung, Proteingehalt und Fusarium-Resistenz (Korninfektion nach künstlicher Inokulation) geprüft. Für genetische Kartierung und Markerentwicklung wurden ausgewählte Linien mittels Whole-Exome-Sequencing resequenziert. Zudem wurden Gewebekulturen für Hafer und Lupine erfolgreich etabliert, als Voraussetzung für DNA-basierte und DNA-freie Transformationen, um damit gezielt allergene Suszeptibilitäts-Gene auszuschalten. Dafür wurden existierende Methoden für Gräser auf die untersuchten Pflanzen übertragen und optimierte Gewebekulturverfahren entwickelt.

**Klimaschutz vom Feld bis zum Konsumenten:** Basierend auf einem 2-jährigen Hafer-Feldversuch (Sorte × Aussaattermin × Bewässerung), Langzeitversuchsdaten (2005-2024) von Hafer und Lupine aus ganz Ostdeutschland, detaillierten Befragungen entlang der Hafer- und Lupinenwertungskette, Lebenszyklusanalysen (LCA) und Lebenszykluskostenberechnungen (LCC), Mixed-Model-Analysen (MMA) einer umfangreichen Konsumentenbefragung und Marktanalyse wurde der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck (Product Carbon Footprint; PCF) von Hafer und Lupine und entsprechender

### HIGHLIGHTS

- Gewebekulturen von Hafer und Lupine erfolgreich etabliert und erstmals Genome-Editierung an Hafer durchgeführt
- Selektion besonders interessanter Genotypen der Hafermutanten und Resequenzierung zur Untersuchung dieser Genotypen
- CO<sub>2</sub>-Fußabdruck von Hafer- und Lupinenanbau sowie Haferdrink und Lupinentempeh als Milch- und Fleischersatz umfassend bewertet

Produkte vom Feld bis zum Konsumenten umfänglich bewertet und spezifische Klimaschutzpotenziale abgeleitet.

**Agrarökonomische Modellierung:** Um Änderungen in der Nachfrage nach Haferdrinks abbilden zu können, wurde das agrarökonomische CAPRI-Modell um verarbeitete und zusammengesetzte Lebensmittel erweitert. Alle Teilergebnisse flossen kontinuierlich zwischen den Partnern, sodass Züchtung, Klimabilanz und Marktanalysen eng verzahnt bleiben.

### ERGEBNISSE

**Feldversuche und Proteinbestimmung:** Auf Grundlage der Ergebnisse der Züchtungsversuche und Proteinbestimmungen an 1200 Haferlinien konnten Genotypen mit besonders vielversprechenden Eigenschaften selektiert und im Jahr 2024 in Groß Lüsewitz (Abb. 1) und Quedlinburg angebaut werden.



Abbildung 1: Selektierte Hafer-Mutanten am Standort Groß Lüsewitz 2024. Infektion mit dem Pilz *Fusarium culmorum*

Es wurden die Phänotypisierungsdaten der Versuchsjahre 2022 und 2023 im Vorfeld genutzt, um ein selektiertes Panel mit 91 Hafermutanten auf Grundlage verschiedener Eigenschaften wie Phänotyp, Proteingehalt, Tausendkorngewicht, Blühzeitpunkt, Wuchshöhe oder Anfälligkeit auf Krankheiten zu erstellen. Insgesamt wurde an 75 vielversprechenden Hafermutanten eine Resequenzierung

## KLIMAWIRKUNG

Das Projekt trägt mittel- bis langfristig durch züchterische Innovationen, durch neue Erkenntnisse zu klimaschonendem Anbau von Hafer und Lupine sowie zum Konsum von heimischen Milch- und Fleischersatzprodukten zum Klimaschutz bei.

Eine Substitution von Kuhmilch durch Haferdrinks würde ~275.000 (bei 10 % Substitution) bzw. ~550.000 t CO<sub>2</sub>-Äq pro Jahr (bei 20 % Substitution) in Deutschland entsprechen.

Eine Reduktion des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks (PCF) von Hafer durch verbesserte Sorten und verbesserten Anbau würde zudem eine Reduktion der THG-Emissionen um 25.000 (bei 10 % PCF Reduktion) bzw. 50.000 t CO<sub>2</sub>-Äq pro Jahr (bei 20 % PCF Reduktion) in Deutschland ermöglichen.

Zusätzliche Klimaschutzpotenziale ergeben sich durch den optimierten Anbau verbesserter Lupinensorten und dessen Ausweitung, sowie durch die Substitution von Fleisch durch heimische pflanzenbasierte Fleischersatzprodukte.

durchgeführt. Die agronomischen Eigenschaften der selektierten Mutanten sind sehr vielversprechend und werden 2026 mehrortig geprüft.

Die im Rahmen des Projekts neu entwickelte und erfolgreich validierte NIR-Kalibrierung für Hafer erlaubt dank Spektren-erfassung, Referenzanalyse und Modellentwicklung eine präzise und zerstörungsfreie Proteinbestimmung für unbekannte Proben (Abb. 2). Dies unterstützt eine noch effektivere zukünftige Züchtung klimaschonender Hafersorten.

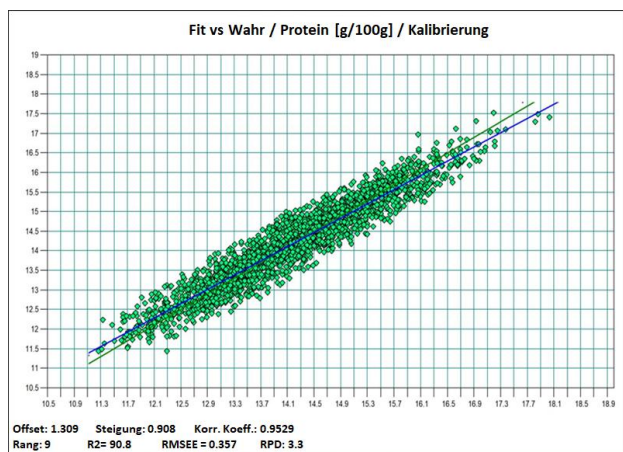


Abbildung 2: Darstellung der entwickelten und validierten NIR-Kalibrierung zur Vorhersage des (Roh)Proteingehaltes mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % für entspelzte und gesunde Haferkörner.

**Entwicklung von Gewebekultur für Hafer und Lupine:** Um Kandidatengene für die Züchtung mittels neuer Techniken zu überprüfen, ist die Etablierung von Gewebekulturverfahren unabdinglich. Im Verlauf des Projektes konnten funktionierende Protokolle für die Gewebekultur von Hafer und Lupine aus verschiedenen Geweben entwickelt und etabliert werden (Abb. 3). Diese Verfahren sind hoch effizient und ermöglichen erstmals den Einsatz neuer

Züchtungsverfahren, die im weiteren Projektverlauf etabliert wurden.

Als geeigneter Kandidat für den Einsatz von Genome Editing konnte das MLO-Gen im Hafer identifiziert werden, dieses Gen vermittelt eine Mehltau-Resistenz. Mit Hilfe eines Plasmid-Vektors und der PEG-vermittelten Transformation wurden die Komponenten für das Genome Editing erfolgreich in Protoplasten des Hafers eingebracht. Aus den transformierten Protoplasten wurde DNA isoliert und mittels Hochdurchsatz-Sequenzierung die Mutationsrate an den Zielorten im Genom bestimmt. Da die entsprechenden Zielsequenzen so gewählt wurden, dass sie perfekt zu den drei Genomen des Hafers passen, konnten diese erfolgreich verändert werden. Die Analyse der ersten Sequenzierungen ergibt insgesamt eine Mutationsrate von ca. 2-3 % über alle drei Allele.

Parallel dazu wurde das Plasmid mit den Genome-Editing-Komponenten durch Agrobakterien vermittelte Transformation stabil in das Hafergenom eingebracht. Die daraus entstandenen Pflanzen werden gerade für eine mögliche Integration in laufende Zuchtprogramme herangezogen.

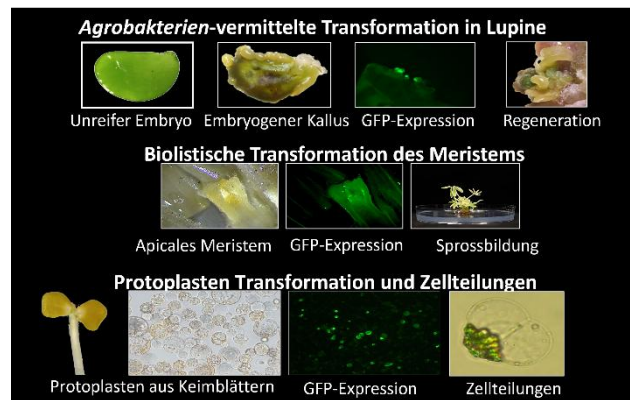


Abbildung 3: Etablierung der Gewebekultur für Lupine. Dargestellt ist die erfolgreiche Regeneration ausgehend vom unreifen Embryo im oberen und die biolistische Transformation des Sprossmeristems im mittleren Teil. Im unteren Teil sind die erfolgreiche Produktion und Transformation von Protoplasten aus Keimblättern exemplarisch dargestellt. GFP steht für das grün fluoreszierende Protein, das als Marker verwendet wurde.

**Klimawirkung Anbau von Hafer und Lupine:** Die sehr unterschiedlichen Witterungsverläufe in 2023 (feuchtes Frühjahr, später trocken) und 2024 (warm-trockenes Frühjahr, später Starkregen) zeigten signifikante Jahreseffekte im Hafer-Feldversuch in Berlin (Abb. 4). 2024 wurden höhere Erträge, mehr Blattfläche und größere Körner erzielt, jedoch geringere Proteingehalte. Die höchsten Erträge wurden bei Bewässerung und früher Aussaat mit 4,5 t/ha (2024) und 3,1 t/ha (2023) erreicht, während unbewässerte späte Saaten bis zu 56 % darunter lagen. Bewässerung steigerte den Ertrag im Mittel um rund 0,8 t/ha bzw. 27 %, frühe Saat um rund 0,6 t/ha bzw. 23 %. Während durch Bewässerung zusätzliche THG-Emissionen insbesondere für die Pump-Energie entstehen, ist eine frühere Aussaat nicht mit erhöhten Emissionen je Hektar verbunden. Dies macht frühe Aussaaten zu einer sinnvollen Maßnahme zur Reduktion des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks im Haferanbau.



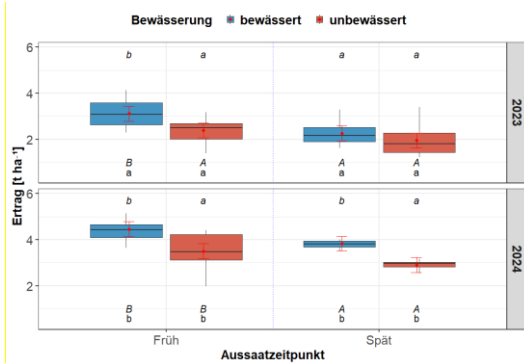


Abbildung 4: Einfluss von Saattermin (früh/spät) und Bewässerung (bewässert/unbewässert) auf Hafererträge in Berlin, getrennt für 2023 und 2024. Varianten die keinen Buchstaben teilen sind signifikant ( $p \leq 0,05$ ) verschieden bzgl. Bewässerung (oben), Saattermin (MITTE) und Jahr (unten).

Auf Basis der freundlicherweise durch die Landeseinrichtungen bereitgestellten Sortenversuchsdaten wurde die raum-zeitliche Entwicklung des CO<sub>2</sub>-Fußabdruck des Lupinen- und Haferanbaus von 2005–2024 mittels LCA und MMA bestimmt (Abb. 5). Der Lupinen-Datensatz umfasste dabei 19 Sorten an 23 Standorten in Ostdeutschland, der Hafer-Datensatz 19 Sorten an 22 Standorten in Ostdeutschland und Baden-Württemberg.

Über alle Jahre und Standorte ergibt sich für Lupine ein PCF\_Korn von 0,15 kg CO<sub>2</sub>-Äq/kg und ein PCF\_Protein von 1,6 kg CO<sub>2</sub>-Äq/kg Protein, und für Hafer von 0,16 kg CO<sub>2</sub>-Äq/kg Korn sowie 3,0 kg CO<sub>2</sub>-Äq/kg Protein. Dabei zeigten sich signifikante Unterschiede zwischen Standorten, Jahren und Anbauregionen. Vergleicht man Lupine mit Hafer, so ist der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck je Kilogramm Korn fast gleich, während er je kg Protein bei Lupine rund 50 % geringer als bei Hafer ist. Neben dem höheren Proteingehalt von Lupine wirkt sich hierbei auch der mögliche Verzicht auf Mineraldünger positiv aus.

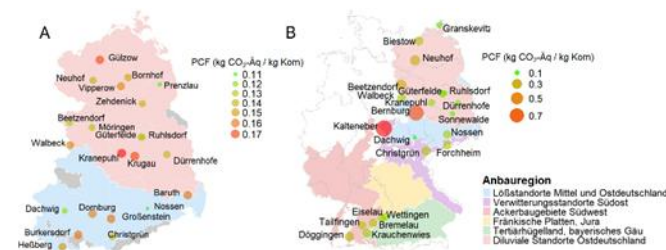


Abbildung 5: (A) Räumliche Unterschiede im CO<sub>2</sub>-Fußabdruck (PCF; kg CO<sub>2</sub>-Äq je kg Korn) von Lupine in Ostdeutschland, und (B) Hafer in Ostdeutschland und Baden-Württemberg basierend auf Landessortenversuchsdaten (2005-2024) der Länder.

Weiterhin zeigen sich große Unterschiede zwischen Jahren und Standorten: Bei Lupine liegt der PCF\_Korn im Mittel bei 0,15, wobei die Werte zwischen den Standorten von minimal 0,11 (Nossen) bis maximal 0,17 (Kranepuhl) reichen, zwischen den Jahren von 0,13 (2018) bis 0,18 (2019). Für Hafer liegt der PCF\_Korn im Mittel bei 0,25. Die Spannweite ist jedoch sehr groß, standortbezogen reicht sie von 0,09 (Dachwig) bis 0,94 (Kalteneber). Zwischen den Jahren variieren die Werte von 0,08 (2015) bis 0,92 (2012).

#### Wertschöpfungskettenanalyse und Akzeptanz:

Der Anteil von Milchalternativen stieg in Deutschland von 5 % (2020) auf über 10 % (2023). Auch der

Fleischersatzmarkt wächst rasant mit jährlich 20-30 % bei pflanzlichen Alternativen.

Der Product Carbon Footprint (PCF) für Haferdrink für die gesamte Wertschöpfungskette (Anbau bis Vertrieb) liegt bei ca. 0,2 kg CO<sub>2</sub>-Äq/l (Abb. 6) und für Lupinentempeh bei ca. 0,4 kg CO<sub>2</sub>-Äq/kg. Bei beiden Produkten hat die Verpackungsart (Glas bzw. Tetra Pak/Plastik) nur unwesentlichen Einfluss auf den PCF. Der Energieverbrauch zur Herstellung ist bei beiden Alternativprodukten die größte Quelle für THG-Ausstoß (0,084 CO<sub>2</sub>-Äq, bzw. 0,215 CO<sub>2</sub>-Äq). Aus ökonomischer Sicht stecken in der Verpackungsart (0,16 EUR/l) die Hauptkosten für Haferdrink (Abb. 6), während bei Lupinentempeh Anbau (0,24 EUR/kg) und Verpackung (0,13 EUR/kg) die größten Kostenquellen darstellen. Die Varianten beider Produkte in Tetra Pak und Plastikverpackung stellen nicht nur die ökonomisch vorteilhafteste Option dar, sondern sind auch der Verwendung von Mehrwegglas bzgl. THG-Emission deutlich überlegen. Erst nach 44 Wiederverwendungen erreicht die Pfandflasche des Haferdrink das Niveau des Tetra Paks.

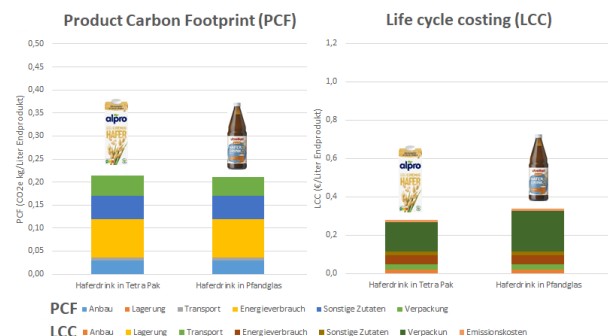


Abbildung 6: Haferdrink: CO<sub>2</sub>-Fußabdruck (Product Carbon Footprint; PCF) und Life Cycle Costing (LCC) in zwei Packungsvarianten, Tetra Pak und Pfandglasflasche.

Die Akzeptanzanalyse von Konsumenten (n=1000) zu Einstellungen, Wahrnehmungen und Präferenzen der Verbraucher gegenüber pflanzlichen Milchersatzprodukten zeigte in einem diskreten Choice Experiment, dass die Befragten nur begrenztes Interesse an Bio- und regionaler Produktion haben. Das Vorhandensein eines Mehrweg- oder Pfand-etiketts erhöhte die Kaufwahrscheinlichkeit signifikant. Produkte mit niedrigen CO<sub>2</sub>-Fußabdruckwerten (PCF) oder mit einem PCF-Symbol wurden stark bevorzugt. Preisunterschiede hatten keinen signifikanten Einfluss.

Die Untersuchung der demografischen Akzeptanz und Substitutionsneigung von Kuhmilch durch Haferdrink zeigt: Personen mit hoher Kaufneigung für Haferdrink sind meist mittleren Alters, gut gebildet und offen für Innovationen. Mittlere Neigung findet sich vor allem bei älteren Menschen mit gemischtem Bildungshintergrund. Geringe Neigung zur Substitution zeigt sich überwiegend bei älteren, gering qualifizierten Männern.

**Abschätzung von Entwicklungsszenarien:** Zur Bewertung des Klimaschutzpotenzials von pflanzenbasierten Milchalternativen ist die Analyse der eingesparten Milchproduktion entscheidend. Da Milch überwiegend nicht als Trinkmilch, sondern in verarbeiteten Produkten konsumiert wird, wurden letztere in Frischmilchäquivalente umgerechnet. Zur Erfassung der Verzehrsmuster sind Studien wie die Nationale Verzehrsstudie II (NVSII) von 2006 zentral, jedoch weisen deren Daten aufgrund von Over- und Underreporting



typischerweise Unsicherheiten auf. Die NVSII-Daten wurden in ein selbst entwickeltes Mengenflussmodell integriert, das die Wertschöpfungskette abbildet und Verzehrdaten mit Marktbilanzdaten, Verarbeitungskoeffizienten, Rezepturen und Abfalldaten verknüpft. So konnten realistische Verzehrsmuster von Milchprodukten identifiziert werden (Säule "Verzehr", Abb. 7): Rund 15 % der Milch werden als Trinkmilch konsumiert, 37 % als Käse, 10 % als Butter und 15 % als Joghurt. Weitere 12 % entfallen auf Milch und Butter in Getreideprodukten (z. B. Kuchen), 11 % auf andere verarbeitete Lebensmittel (z. B. Käse auf Pizza).

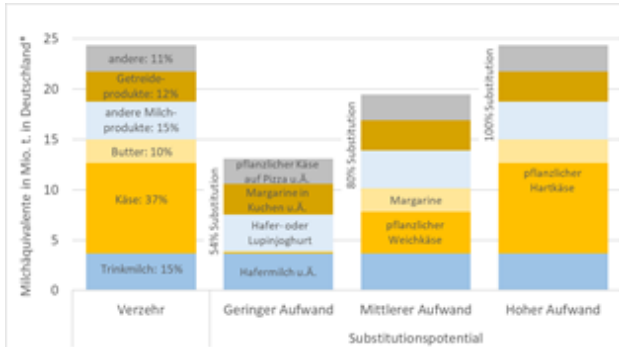


Abbildung 7: Verzehr von Milchprodukten und Substitutionspotenzial von pflanzlichen Alternativprodukten in Milchäquivalenten in Deutschland pro Jahr (Referenzjahr 2006).

Diese Differenzierung ist grundlegend für die Quantifizierung des Substitutionspotenzials pflanzlicher Alternativen. Hierzu wurde eine Datenbank entwickelt, die Alternativen für Milchprodukte erfasst und nach Substitutionsaufwand klassifiziert. Als mit geringem Aufwand substituierbar gelten u. a. Trinkmilch, Joghurt, Milch und Butter in Getreideprodukten sowie Käse in industriell verarbeiteten Lebensmitteln wie Pizza. Allein durch diese Substitutionen lassen sich 54 % der jährlich in Deutschland verzehrten Milchäquivalente einsparen (Abb. 7: Säule "geringer Aufwand"). Mit mittlerem Aufwand können insgesamt 80 % substituiert werden, etwa beim Verzehr von Butter oder Käse. Da der Eigengeschmack dieser Milchprodukte beim direkten Verzehr stärker ins Gewicht fällt als bei zusammengesetzten Produkten, wird die Substitution als aufwändiger für die Konsumierenden klassifiziert (Säule "mittlerer Aufwand", Abb. 7). Für die verbliebenen Milchprodukte gibt es kaum überzeugend ähnliche Alternativen mit weiter Marktverbreitung, weswegen die letzten 20 % zur vollständigen Substitution als sehr aufwändig kategorisiert wurden (Säule "hoher Aufwand", Abb. 7).

Das entwickelte Mengenflussmodell ermöglicht es, die Auswirkungen von Verbesserungen einzelner Alternativprodukte oder Veränderungen in der Konsumierendenakzeptanz auf Markt- und Agrarsektorebene zu simulieren.

## SCHLUSSFOLGERUNGEN

- Die Etablierung effizienter Gewebekulturverfahren und Transformationstechniken für Hafer und Lupine ebnet den Weg für den erfolgreichen Einsatz präziser Genome-Editing-Verfahren in Forschung und Pflanzenzüchtung.
- Die Selektion und genetische Charakterisierung vielversprechender Hafermutanten sowie die entwickelte präzise Proteinbestimmung mittels NIRS fördern die Züchtung protein- und ertragreicher klimaschonender Hafersorten.
- Frühe Aussaaten im Hafer ermöglichen eine Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks gegenüber späten Saaten.
- Lupinenprotein hat einen fast 50 % geringeren CO<sub>2</sub>-Fußabdruck als Haferprotein.
- Die Wertschöpfungskettenanalyse zeigt, dass pflanzliche Milch- und Fleischalternativen ökologisch vorteilhaft sind. Ein zentraler Treiber für pflanzliche Milchalternativen ist die hohe Verbraucherpräferenz für Produkte mit niedrigem CO<sub>2</sub>-Fußabdruck und klarer Nachhaltigkeitskennzeichnung. Ein wesentliches Hemmnis stellt die geringe Substitutionsbereitschaft bestimmter Bevölkerungsgruppen dar.

Die Integration realistischer Verzehrsmuster in ein Mengenflussmodell ermöglicht eine differenzierte Bewertung des Substitutionspotenzials pflanzenbasierter Milchalternativen und damit eine fundierte Abschätzung ihrer Klimaauswirkungen auf Markt- und Agrarsektorebene.

## AUSGEWÄHLTE VERÖFFENTLICHUNGEN

- Pathi & Sprink (2023): From Petri Dish to Field: Plant Tissue Culture and Genetic Engineering of Oats for Improved Agricultural Outcomes. *Plants*, 12, 3782.
- Karpinski et al. (2024): Treibhausgasreduktion durch Forschung an pflanzlichen Proteinquellen – retten wir mit Haferdrinks das Klima? *Getreide, Mehl und Brot*, 30(3), 2–9.
- Pathi, & Sprink (2025): Lupins in the Genome Editing Era: Advances in Plant Cell Culture, Double Haploid Technology and Genetic Transformation for Crop Improvement. *Frontiers in Plant Science*.

## Handlungsempfehlungen für Politik und Praxis

Hafer und Lupine als wichtige pflanzliche Proteinquellen sollten an geeigneten Standorten unter optimierten Bedingungen produziert werden, wobei Lupinenprotein grundsätzlich klimafreundlicher als Haferprotein ist. Agrarpolitische Maßnahmen zur gezielten Anbauberatung und Förderung regionaler Wertschöpfungsketten können den Klimaschutz weiterbefördern. Die Einführung von CO<sub>2</sub>-Fußabdruck-Labels auf pflanzenbasierten Milch- und Fleischersatzprodukten können deren Absatz wirksam unterstützen. Ergänzend könnten gezielte Informations- und Bildungsoffensiven größere Teile der Bevölkerung für eine klimaschonendere Ernährung gewinnen.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Herstellung und Einsatz von Holzfaserstoffen als Torfersatz

**Fokko Schütt, Jörn Appelt, Dirk Behrens, Rodrigo Coniglio, Sebastian Rüter und Faye Stulz (Thünen-Institut); Ute Vogler und Bunlong Yim (Julius Kühn-Institut)**

### ZIELSETZUNG

Technologische Ziele des Vorhabens waren, den möglichen Einsatz von Holzfaserstoffen in Pflanzsubstraten zu erhöhen, die Rohstoffbasis zu erweitern sowie vor dem Hintergrund der EU-Düngeprodukteverordnung zur Aufklärung der Entstehung von Nebenprodukten bei Zerkleinerungsprozessen über 100 °C beizutragen.

Weiteres Ziel war eine Einschätzung des möglichen Treibhausgas (THG)-Minderungsbeitrages durch die Nutzung von Holzfasern aus einheimischen Roh- und Reststoffen für den Ersatz von Torf als Kultursubstrat.

### METHODIK

Zur Bewertung der Nebenprodukte wurden Temperaturreihen zwischen 100 °C und 185 °C mit verschiedenen Rohstoffen (Laubholz, Nadelholz und krautige Pflanzen) durchgeführt und die Nebenprodukte in den wässrigen Extrakten gaschromatographisch untersucht sowie die Phytotoxizität mittels Kresstest (DIN EN 16086-2) bewertet.

Die Stickstoff-(N)-Immobilisierung durch mikrobiellen Abbau der im Pflanzsubstrat enthaltenen Komponenten ist einer der begrenzenden Faktoren für den Einsatz von Torfersatzstoffen. Im Holz ist das enthaltene Lignin resistenter gegenüber mikrobiellem Abbau als die Cellulose- und Hemicellulosefraktion. Als Ansatz zur Stabilisierung der Holzfasern wurden daher Prozesse zur Anreicherung der Fasern mit zusätzlichem Lignin erforscht. Die Methode zur Ligninanlagerung wurde zunächst im Labormaßstab an bereits zerkleinerten Stoffen entwickelt und anschließend auf den Technikumsmaßstab übertragen. Im Technikumsrefiner wurde dazu die Zerkleinerung mit der Ligninanreicherung in einem Schritt kombiniert.

Zusätzlich wurden durch eine oxidative Anlagerung von Stickstoff an verschiedenen Ligninen Substratausgangsstoffe mit erhöhtem Stickstoffgehalt erzeugt, um längerfristig zusätzlichen Stickstoff im Pflanzsubstrat zur Verfügung zu stellen.

Es wurden Chinakohltests gemäß VDLUFA A 10.2.1 mit Nadelholzfaserstoffen sowie umfangreichere Pflanzversuche (Basilikum, Tagetes) mit verschiedenen Mischungen der Laubholzfaserstoffe von Birke (Anteil 100 %, 70 %, 50 % und 30 %) und N-Lignine (Anteil 2 %, 4 % und 8 %) mit Torf durchgeführt, um die erzeugten Produkte zu bewerten. Zusätzlich wurde im Unterauftrag die N-Immobilisierung der Faserstoffe bewertet.

Im Rahmen der Ökobilanz wurde ein strukturierter Fragebogen verwendet, um die notwendigen Primärdaten zu erfassen. Dieser wurde im Rahmen des Projekts entwickelt und speziell auf die Anforderungen der Substratproduktion angepasst. Ziel der Erhebung ist es, alle relevanten Input- und Outputströme eines Produktionsstandorts innerhalb

### HIGHLIGHTS

- Zwischen 100 und 150 °C kein eindeutiger Einfluss der Zerkleinerungstemperatur auf die Bildung von Nebenprodukten erkennbar
- Laut Phytotoxizitätstest können Zerkleinerungstemperaturen bis 150 °C in Betracht gezogen werden
- Die Stickstoffanreicherung am Lignin konnte durch Preaktivierung des Lignins maßgeblich verbessert werden
- Die Zugabe von N-Ligninen verbesserte die Leistung von Substraten aus 100 % Fasern in Pflanzwachstumsversuchen
- Erfolgreiche Pflanzversuche mit ligninangereicherten Laubholzfaserstoffen:
  - Laubholzfaserstoffe konnten zu 50 % Torf ersetzen
  - Die Zugabe von 2 % Lignin zu Laubholzfaserstoffen verbesserte das Pflanzenwachstum

eines festgelegten Geschäftsjahres systematisch und vollständig zu dokumentieren.

Der Fragebogen ist in modulare Abschnitte gegliedert, die den gesamten Produktionsprozess abbilden. Er enthält allgemeine Unternehmensdaten wie Standort, Produktionszeitraum und Betriebsstruktur sowie detaillierte Informationen zu den verwendeten Technologien und Verfahren. Ein Schwerpunkt liegt auf der Erfassung organischer und mineralischer Ausgangsstoffe, wobei Torf und Holz am umfangreichsten abgedeckt werden. Zudem werden Daten zu Endprodukten, Verpackungen, Nebenprodukten, Abfällen, Betriebsstoffen, Energieverbrauch und Transport im Zusammenhang mit der Produktion gesammelt.

### ERGEBNISSE

#### Entstehung von Nebenprodukten über 100 °C und deren Phytotoxizität

Niedermolekulare Nebenprodukte in den Prozesswässern wurden per GC-MS/FID teils qualitativ bestimmt sowie zu einem erheblichen Anteil zusätzlich quantifiziert. Ein stärkerer Anstieg der Nebenprodukte wurde erst bei Temperaturen ab 165 °C und noch deutlicher bei 185 °C gefunden, während bei Temperaturen zwischen 120 °C und 150 °C kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Zerkleinerungstemperatur und dem Wachstum der Kresse festgestellt wurde (Abb. 1).

Zusätzlich zeigte sich, dass die Ausgangsrohstoffe einen größeren Einfluss auf die Phytotoxizität der Extrakte hatten, als die Zerkleinerungstemperatur. Im Allgemeinen bewirkten die Extrakte der Gras- und Riedpflanzen eine deutlich höhere Wachstumshemmung als die Holzigen Rohstoffe.

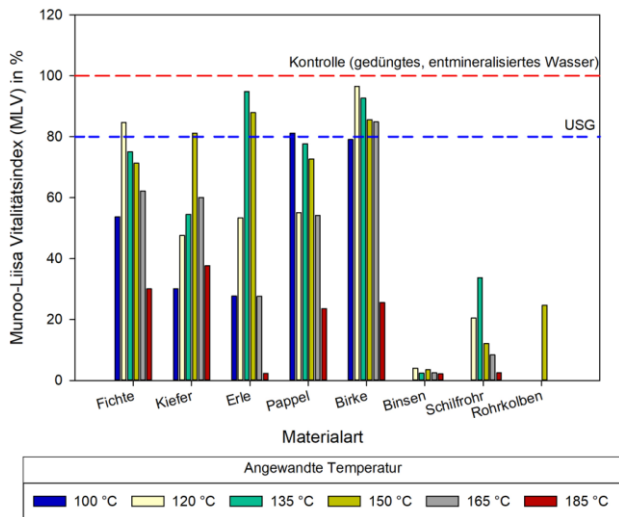


Abbildung 1: Untersuchung der Pflanzenverträglichkeit gemäß DIN EN 16086-2 Extraktverfahren (Kressetests)

### Entwicklung N-angereicherter Lignine und Substrate

Für die Erzeugung stickstoffangereicherter Lignine (N-Lignine) wurde zunächst eine umfangreiche Literaturrecherche angefertigt und in einem Review-Paper veröffentlicht (Coniglio et al. 2024). Darin wurde dargestellt, dass für den Einsatz in Pflanzsubstraten eine mittelfristige N-Freisetzung besonders interessant ist. Dies trifft bei N-Ligninen vor allem für Stickstoff zu, der in Amid-Strukturen gebunden ist. Ein besonderer Fokus lag daher auf der selektiven Einbringung von Amidstickstoff. Hierfür wurden zunächst die Reaktionsbedingungen während der N-Anlagerung bezüglich Temperatur, Druck und Behandlungsdauer optimiert. Es wurde festgestellt, dass durch diese Optimierung der Anteil an Amidstickstoff nicht wesentlich gesteigert werden konnte (Coniglio et al. 2025). Daher wurden in der Folge verschiedene Strategien zur Voraktivierung von Lignin untersucht, darunter Sauerstoff-, Wasserstoffperoxid- und Peressigsäurebehandlungen, um die Reaktivität des Lignins vor der Ammonoxidation gezielt zu verändern. Die strukturellen Veränderungen sowie deren Einfluss auf den Stickstoffeinbau wurden umfassend charakterisiert.

### Ligninanlagerung zur Reduzierung der N-Immobilisierung

Die Ligninanlagerung wurde im Labormaßstab zunächst an industriell verfügbaren Nadelholzfaserstoffen entwickelt und optimiert. Dazu wurde Lignin in alkalischer Kaliumhydroxidlösung gelöst, mit Faserstoff vermischt und anschließend durch Ansäuerung mit Phosphorsäure auf der Faser ausgefällt. Durch anschließende Waschversuche konnte gezeigt werden, dass es gelungen ist, einen wesentlichen Anteil des eingebrachten Lignins auf der Faser so zu binden, dass es während des Gießvorgangs nicht wieder ausgewaschen wird. Abbildung 2 zeigt die im Filtrat aus Waschversuchen gefundenen Mengen an Lignin und Kohlenhydraten, dargestellt als Waschverluste bezogen auf den Fasereinsatz. Bei Einsatzmengen an Lignin von 2 % liegt die Menge an Lignin im Waschfiltrat in gleicher Höhe wie in den Filtraten der Naturfaser sowie der Nullprobe, welche ausschließlich der Alkali-/Säurebehandlung unterzogen wurde, ohne Lignin hinzuzugeben. Bei einer Zugabe von 10 % Lignin wurde eine Menge von 3,4 % Lignin bezogen auf die eingesetzte Faser im Waschfiltrat gefunden. Dies zeigt, dass bei höheren Zugaben zwar der größere Teil an angelagertem

Lignin auf der Faser gebunden werden konnte, gewisse Mengen jedoch ausgewaschen wurden. Durch eine anschließende Temperaturbehandlung der Fasern bei 140 °C konnte diese Menge jedoch deutlich verringert werden (Abb. 2). Basierend auf diesen Ergebnissen wurden die Bedingungen der Upscaling-Versuche mit Laubholz geplant.

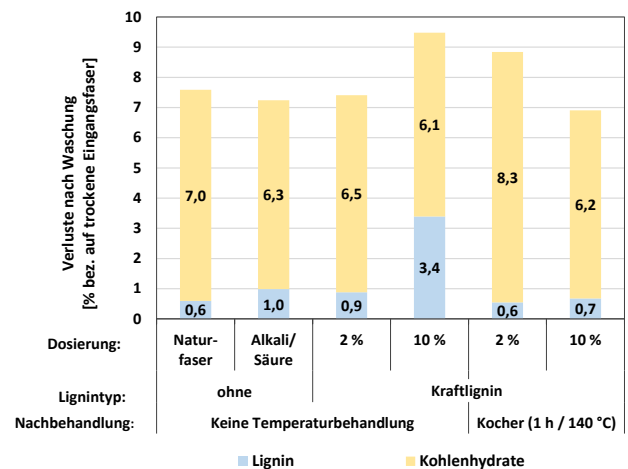


Abbildung 2: Quantifizierung der Ligninverluste bei den Waschversuchen der Faserstoffe nach Ligninanlagerung

### Pflanzenverträglichkeitstest: Chinakohl

Die Pflanzenverträglichkeit der ligninangereicherten Fasern sowie der N-angereicherten Lignine aus den Laborversuchen wurden im Rahmen von Kresse- und Chinakohltests getestet und die Ergebnisse dieser Tests teilweise bereits veröffentlicht (Coniglio et al. 2025). In diesen Versuchen förderte die Zugabe von 2 % N-angereichertem Organocell-Lignin in Substraten mit 50 % bzw. 100 % Holzfasern das Pflanzenwachstum im Vergleich zu ligninfreien Substraten. Diese vorläufigen Ergebnisse bedürfen weiterer Untersuchungen, um sie statistisch absichern zu können.

### Upscaling der Ligninanlagerung an Laubholzfaserstoffen

Auf einem Technikumsrefiner des Fraunhofer Instituts für Holzforschung (WKL) wurden Upscalingversuche für den Prozess der Ligninanlagerung durchgeführt. Dabei wurden die Bedingungen zur Ligninlösung und -ausfällung aus den Laborversuchen adaptiert. Zusätzlich konnten Zerkleinerung sowie die Lignin-Anlagerung in einem Schritt kombiniert werden. Dafür wurde die Ligninlösung in der Zuführschnecke zum Refiner zu den Hackschnitzeln gegeben und die Fasern direkt nach der Zerkleinerung mit Phosphorsäure angesäuert, um das Lignin auszufällen. Um die Fasern lagerstabil zu machen, wurden diese bis auf ca. 10 % Restfeuchte heruntergetrocknet. Durch die Behandlungsschritte mit unterschiedlichen Einsatzmengen an Lignin konnte die N-Immobilisierung gegenüber der Naturfaser in unterschiedlichem Maße reduziert werden.

### Pflanzenverträglichkeitstest: Basilikum und Tagetes

Zur Bewertung der Pflanzenverträglichkeit der ligninangereicherten Laubholzfaserstoffen wurden umfangreichere Pflanzversuche mit Basilikum und Tagetes durchgeführt. Beiden Pflanzenarten reagierten ähnlich auf die unterschiedlichen Substratmischungen. Substrate mit 100 % Laubholzfaserstoffen förderten das Pflanzenwachstum nicht, was sich besonders ausgeprägt beim Basilikum zeigte. Zwar wuchsen Tagetes besser als Basilikum, doch waren auch hier Biomasse,

Habitus und Blüte im Vergleich zu den anderen Substratmischungen am geringsten (Abb. 3). Ein höherer Torfanteil im Substrat sorgte für ein verbessertes Pflanzenwachstum. Die Daten zeigen, dass sowohl die Pflanzenbiomasse als auch der Chlorophyllgehalt der Pflanzenblätter sowie der Photosynthese-Leistungsindex der in dem Substrat mit 50 % Laubholzfasern kultivierten Pflanzen vergleichbar zu den im Torf als Kontrolle kultivierten Pflanzen war (Yim et al. 2025). Es war außerdem zu beobachten, dass die mit 2 % Lignin versetzten Laubholzfasern ein verbessertes Pflanzenwachstum gegenüber den unbehandelten Laubholzfasern aufwiesen.



Abbildung 3: Basilikum und Tagetes wachsen im Substrat mit 2 % Kraftlignin und aus verschiedenen Mischungen. T, Torf; H, Laubholzfasern; 100, 70, 50 und 30 stehen für Substrat mit Laubholzfaserteilen von 100 %, 70 %, 50 % bzw. 30 %.

#### Ökobilanzierung und möglicher THG-Minderungsbeitrag

Trotz intensiver Bemühungen konnten keine zuverlässigen Primärdaten von Substratherstellern gesammelt werden, um eine vollständige und vergleichbare Ökobilanz der Substratproduktion zu erstellen. Mehrere Unternehmen, die zunächst eine Zusammenarbeit zusagten, zogen diese später zurück oder konnten die erforderlichen Daten nicht in der benötigten Qualität liefern. Als Grund wurde vor allem der zeitliche Aufwand für die Datenerhebung genannt. Auch das Vorhandensein bereits etablierter Bewertungsinstrumente, die in Teilen der Branche genutzt werden, sowie mögliche Abweichungen in den Ergebnissen durch eine vertiefte Untersuchung im Rahmen dieses Projekts könnten die Bereitschaft der Branche, Daten bereitzustellen, verringert haben. Trotzdem lieferten die Gespräche wertvolle Erkenntnisse über die aktuelle Datenlage und die wichtigsten Gründe für die Bewertung der Vorteile von Holz als Substratersatz.

Die biogenen Emissionen sowohl aus Torf wie auch aus Holz werden nach den IPCC-Leitlinien im Sektor Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF) bilanziert. Die Emissionen aus Torf, die durch die Freisetzung von im Boden über Jahrtausende gebundenem Kohlenstoff infolge von Entwässerung und Nutzung organischer Böden entstehen, werden anhand der abgebauten Torfmenge, der Abbaufächen und eines entsprechenden Emissionsfaktors ermittelt. Aufgrund des schnellen Nachwachsens der Waldbiomasse und seines Rohstoffs Holz erfolgt die Bilanzierung anders als bei Torf, über die Erfassung der Änderung der Kohlenstoffspeicher in Wald und Holz. Eine

#### KLIMAWIRKUNG

Eine breitere Rohstoffbasis für die Holzfaserstoffherzeugung erweitert die Möglichkeiten, Torf in Pflanzsubstraten zu ersetzen. Insbesondere in Kombination mit der Wiedervernässung von Moorflächen kann dies zu einer Minderung der THG-Emissionen beitragen. Beim direkten Vergleich des Einsatzes von Holzfaserstoffen mit dem Einsatz von Torf in Pflanzsubstraten muss die unterschiedliche Einordnung der biogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Ökobilanz kritisch hinterfragt werden.

Vergrößerung dieser Speicher führt dabei zu einer Netto-Senkenwirkung. Entspricht der Biomassezuwachs bzw. die auf den Produktspeicher übertragene Kohlenstoffmenge der durch Zerfall oder Nutzung freigesetzten CO<sub>2</sub>-Emissionen, befinden sich die Speicher im Fließgleichgewicht und sind quasi „CO<sub>2</sub>-neutral“.

Bei einem ökobilanziellen Vergleich der Materialien Holz und Torf im Substrat auf Produktebene hat der unterschiedliche methodische Umgang mit der genannten zeitlichen Dynamik der biogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen hingegen maßgeblichen Einfluss auf die Bewertung eines möglichen Vorteils von Holz als Substratersatz für Torf. Während der mit dem Torfabbau verbundene Kohlenstoffverlust, der den CO<sub>2</sub>-Emissionen des Zerfalls des Torfes in der nachgelagerten Nutzung des Substrates entspricht, in cradle-to-gate-Ökobilanzen quasi als „fossile“ Emission berücksichtigt wird, werden die biogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen der Holzfasern als Torfersatz generell als CO<sub>2</sub>-neutral gewertet. Dies ist im Zuge von standardisierten Produktökobilanzen, die die Umweltbewertung auf eine „funktionelle Einheit“ beziehen, bei stofflich genutzten Holzprodukten zwar korrekt, jedoch muss klar sein, dass im Fall der auftretenden Zersetzungsprozesse der Substrate im Zuge ihrer Nutzung der materialinherente Kohlenstoff sowohl aus Torf als auch aus Holzfasern de facto CO<sub>2</sub>-Emissionen und andere mögliche Treibhausgase (THG) verursacht. Damit zeigt sich, dass zwar die biogene CO<sub>2</sub>-Bilanz in Holz, die mit dem materialinherenten Kohlenstoffgehalt korreliert, methodisch korrekt in Ökobilanzen quantifiziert wird; die unterschiedliche Interpretation dieser Bilanz kann in den Ökobilanzergebnissen jedoch zu möglicherweise falschen Schlussfolgerungen führen. Hinzu kommt, dass Holzfasern, um überhaupt als Torfersatz fungieren zu können (Stichwort: funktionelle Äquivalenz), unter hohem Energieaufwand hergestellt und u. a. thermisch behandelt werden müssen (s. o.). Diese Aufwendungen werden in Ökobilanzen detailliert erfasst und transparent ausgewiesen. Es zeigt sich, dass der deutlich höhere Aufwand für die Herstellung und Behandlung der Holzfasern im Ergebnis zu höheren THG-Emissionen bei deren Produktion führt als bei Torf. Eine generelle „Vorteilhaftigkeit“ von Holz als Substratersatz kann daher nur vor dem Hintergrund des Aufwandes für seine Herstellung sowie der Verfügbarkeit des nachwachsenden Rohstoffs Holz für solche Anwendungen und mögliche Nutzungsalternativen bewertet werden (Stichwort: Bioökonomie). Nur bei einem ausreichenden Angebot des heimischen Rohstoffs und einer nachhaltigen Bewirtschaftung, die sich in einer ausgeglichenen CO<sub>2</sub>-Bilanz



oder gar einer Senke widerspiegelt, kann Holz als Torfersatzstoff einen positiven Einfluss haben.

### SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Ergebnisse aus den Temperaturreihen legen nahe, dass eine Temperaturbeschränkung bei der Holzerfaserung grundsätzlich sinnvoll erscheint, da bei sehr hohen Temperaturen potenziell inhibierende Substanzen in größeren Mengen entstehen. Es sollte jedoch eine Erhöhung der Temperaturgrenze, z. B. auf 150 °C, diskutiert werden, da bis zu dieser Temperatur kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Zerkleinerungstemperatur und Beeinflussung des Pflanzenwachstums festgestellt wurde.

In den Pflanzversuchen mit ligninangereicherten Fasern konnten vielversprechende Ergebnisse erzielt werden, die darauf schließen lassen, dass eine Herabsetzung der Stickstoff-(N)-Immobilisierung und in der Folge die Erhöhung des Holzfaserstoffanteils in Substraten sowie eine Erweiterung der Rohstoffbasis für die Faserstoffherzeugung erzielt werden könnte. Bei der Rohstoffauswahl muss jedoch berücksichtigt werden, dass offensichtlich aus dem Rohstoff selbst pflanzeninhibierende Stoffe eingebracht werden können. Die getesteten Laubhölzer zeigten sich in diesem Zusammenhang als geeignete Rohstoffe. Bezüglich der N-Immobilisierung wären weitere Untersuchungen, insbesondere zur Kombination der N-Anreicherung im Lignin sowie der anschließenden Anreicherung von Faserstoffen mit diesen Ligninen förderlich.

### AUSGEWÄHLTE VERÖFFENTLICHUNGEN

- Coniglio R, Schütt F, Appelt J (2024): Challenges for the utilization of ammoxidized lignins and wood fibres as a peat substitute in horticultural substrates. *Journal of Cleaner Production* 475. doi. 10.1016/j.jclepro.2024.143737
- Coniglio R, Behrens D, Schütt F, Roesky N, Vogler U, Appelt J (2025): Exploring the potential of ammoxidation of lignins to enhance amide-nitrogen for wood-based peat alternatives and its impact on plant development. *Holzforschung* 2025; doi. 10.1515/hf-2024-0127
- Schütt F, Appelt J, Behrens D, Coniglio R, Roesky N, Vogler U (2025): Herstellung und Einsatz von Holzfaserstoffen als Torfersatzstoff (HoFaTo). Posterpräsentation Statustagung „Torfminderung im Gartenbau“, Berlin, 19.-20.03.2025 <https://veranstaltungen.fnr.de/statustagung-torfminderung-im-gartenbau/rueckblick>
- Yim B, Schütt F, Behrens D, Vogler UK (2025) Torfersatz: Erforschung der potenziellen Verwendung von Laubholzfasern als Torfersatz im Gartenbau. Bericht, 79. ALVA – Jahrestagung 2025. [https://www.openagrar.de/receive/openagrar\\_md\\_00109200](https://www.openagrar.de/receive/openagrar_md_00109200)

### HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN FÜR POLITIK UND PRAXIS

Da bei der Holzerfaserung im Bereich von 100 °C bis 150 °C kein eindeutiger Einfluss der Zerkleinerungstemperatur auf die Performance in Keimpflanzentests nachgewiesen werden konnte, sollte angestrebt werden, die bestehenden Möglichkeiten zum Einsatz von Holzfaserstoffen, die bei Temperaturen über 100 °C zerkleinert wurden, aufrecht zu erhalten.

Die Entwicklung funktionaler Torfersatzstoffe, die einen stabilen Stickstoffhaushalt im Pflanzsubstrat gewährleisten, sollte weiterhin unterstützt und vorangetrieben werden.

Bei der Bewertung von Treibhausgasemissionen von Torf und Torfersatzstoffen in Pflanzsubstraten besteht die Notwendigkeit, die Ansätze in der Klimaberichterstattung und Ökobilanzierung weiterzuentwickeln, um eine konsistente und realitätsnahe Bewertung beider Materialien zu gewährleisten. Diese Entwicklung sollte in Zukunft kritisch diskutiert werden.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Landwirtschaft, Ernährung  
und Heimat

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Ökonomische und ökologische Potentiale von Paludikulturen auf wiedervernässten Moorstandorten zum Klimaschutz

Jovanka Saltzmann, Oliver Maaß, Lars Kretschmer, Doreen Koltermann, Saskia Bacher, Burkhard Golla und Maren Langhof

### ZIELSETZUNG

Landwirtschaftliche genutzte entwässerte Moorböden verursachten 2023 rund 42,1 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq (UBA 2025). Sie bieten ein erhebliches Potenzial zur Minderung von Treibhausgasen (THG), sofern sie wiedervernässt werden. Das Projekt untersuchte die ökonomischen und ökologischen Potentiale von Paludikulturen auf wiedervernässten Moorstandorten, insbesondere von Schilf und Rohrkolben, um deren Beitrag zum Klimaschutz und zur nachhaltigen sowie wirtschaftlichen Flächenbewirtschaftung zu bewerten.

Auf Grundlage von GIS-Analysen wurden geeignete Standorte für die Wiedervernässung identifiziert, bewertet und kartiert, während Ertrags-, Qualitäts- und Nutzungspotentiale modelliert wurden. Darüber hinaus wurden anhand von Befragungen Wertschöpfungsketten zur stofflichen Nutzung von Paludikulturen in Baustoffen untersucht. Ziel der Analyse war es, u. a. zentrale Voraussetzungen sowie Hemmnisse für die Entwicklung der Wertschöpfungsketten in Deutschland zu ermitteln. In ergänzenden Szenarioanalysen wurden die potenziellen THG-Einsparungen durch die Wiedervernässung der identifizierten Flächen quantifiziert und die damit verbundenen Kosten für Vernässung und Anbau der untersuchten Paludikulturen geschätzt.

### METHODIK

#### Potenzialflächenanalyse

Die Standortbewertung erfolgte auf Basis eines mehrstufigen Bewertungsansatzes nach Koppensteiner et al. (2023) unter projektspezifischer Anpassung der Parameter. In die Bewertung einbezogen wurden Moortyp (Niedermoor, Moorfolgeboden), Torfmächtigkeit, mittlerer Grundwasserflurabstand sowie die klimatische Wasserbilanz des Sommerhalbjahres. Die Kriterien wurden nach einem Ampelschema bewertet, gewichtet und zu einem Gesamtindex zusammengeführt. Nicht geeignete oder methodisch verzerrende Flächen – wie Tiefumbruchböden, stark überlagerte Böden, oder Böden deren Torfschicht bereits weitgehend aufgezehrt ist – sowie Hochmoore wurden von der Analyse ausgeschlossen. Die Berechnung erfolgte in R, und die ermittelten Potenzialflächen wurden anschließend im Web-GIS-Viewer dargestellt.

#### Szenarioanalyse – Treibhausgaseinsparungspotenzial

Für die THG-Bilanzierung kamen Emissionsfaktoren aus dem MOOR-Use-Datensatz (Eickenscheidt et al., 2023) zum Einsatz, die mit torfmächtigkeits- und nutzungsabhängigen Kohlenstoffspeicherwerten kombiniert wurden. Die Berechnungen erfolgten flächenbezogen und differenziert nach Nutzungstyp (Acker, Grünland) sowie Bewirtschaftungsintensität (intensiv/extensiv) in Anlehnung an die IPCC-Systematik.

### HIGHLIGHTS

- Bundesweite Potenzialanalyse identifiziert geeignete Moorstandorte für Wiedervernässung und den Anbau von Paludikulturen.
- Modellierung von Erträgen und THG-Minderungspotenzialen liefert eine Grundlage für Klima- und Nutzungsstrategien.
- Web-GIS-Viewer visualisiert die Potenzialflächen.
- Wertschöpfungskettenanalyse zeigt Voraussetzungen, Risiken und Hemmnisse für die Produktion und Nutzung von Baustoffen aus Paludikulturen.

#### Szenarioanalyse – Ökonomische Folgen

Für die identifizierten Potenzialflächen wurden die Standarddeckungsbeiträge der im Wirtschaftsjahr 2022/2023 nach Schwieder et al. (2024) auf den entwässerten Standorten angebauten Kulturen ermittelt und unter verschiedenen Annahmen mit den geschätzten Kosten für die Wiedervernässung sowie den Anbau von Schilf und Rohrkolben verglichen. Die Deckungsbeiträge wurden der KTBL-Datenbank (2025) entnommen. Die angenommenen Kosten basieren auf Befragungsergebnissen und Schätzungen von Wichmann et al. (2022).



Abbildung 1: Schilfrohmatten als Baustoff in der Restaurierung  
Foto: J. Saltzmann/JKI

#### Wertschöpfungskettenanalyse

Im Rahmen der Analyse von Wertschöpfungsketten für Baustoffe aus Paludikulturen wurden zwischen 2023 und 2025 insgesamt 26 Experteninterviews (face-to-face, online oder telefonisch) mit 27 Akteurinnen und Akteuren aus Deutschland durchgeführt. Die Befragten wurden gezielt aufgrund ihrer Expertise in den Bereichen Wiedervernässung von Mooren, Anbau von Paludikulturen sowie Produktion und Vermarktung von Baustoffen aus Paludikulturen ausgewählt. Die Interviews, die zwischen 30 und 158

## KLIMAWIRKUNG

Die Flächenbewertung und Szenarioanalysen zeigen, dass die Wiedervernässung und Nutzung mit Paludikulturen erhebliche Treibhausgasminderungspotenziale bieten. Durch die Anhebung des Wasserstands auf den 334.441 ha gut und mäßig geeigneten Niedermoorflächen in Deutschland, können die Treibhausgasemissionen um bis zu 15,16 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq a<sup>-1</sup> reduziert werden. Das entspricht 36 % der gesamten THG-Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Mooren (LULUCF) bzw. 15,6 %, wenn zusätzlich auch die der Landwirtschaft zugeordneten THG-Emission berücksichtigt werden (UBA 2025). Zusätzlich stabilisieren nasse Nutzungssysteme den Torfkörper und vermeiden langfristig CO<sub>2</sub>-Freisetzungen durch Sackung und Mineralisierung.

Die Ergebnisse der Wertschöpfungskettenanalyse liefern praxisrelevante Hinweise zur Inwertsetzung von wiedervernässten Moorstandorten und damit zur Umsetzung der im Projekt untersuchten Klimaschutzmaßnahmen. Zudem ist ein positiver Effekt durch Substitution energieaufwändiger konventioneller Baustoffe durch Baustoffe aus Paludikultur zu erwarten.

Minuten dauerten, folgten einem semi-strukturierten Leitfaden, um sowohl den Vergleich der Antworten als auch Flexibilität bei der Interviewführung zu ermöglichen. Die erhobenen Daten wurden anschließend anhand einer qualitativen Inhaltsanalyse unter Verwendung der Software MAXQDA systematisch ausgewertet.

## ERGEBNISSE

### Potenzialflächenanalyse

Die kombinierte Bewertung der Flächen anhand der Kriterien Moortyp, Torfmächtigkeit, Grundwasserflurabstand und klimatischer Wasserbilanz ergab ein theoretisches Wiedervernässungspotenzial von rund 1,9 Mio. ha landwirtschaftlich genutzter organischer Böden. Nach dem Ausschluss von Flächen mit naturschutzfachlichen Restriktionen verbleiben davon etwa 0,48 Mio. ha. Etwa 31 % (145.586 ha) dieser Flächen wurden als gut geeignet, 40 % (188.856 ha) als mäßig geeignet und 28 % (130.938 ha) als gering geeignet für eine Wiedervernässung eingestuft. Der Anteil gut und mäßig geeigneter Flächen ist in Niedersachsen, Mecklenburg-Vorpommern und Brandenburg am größten.

### Szenarioanalysen

In die Szenarioanalyse der THG-Einsparpotenziale sowie der ökonomischen Folgen flossen die gut und mäßig geeigneten Flächen mit einem Flächenumfang von insgesamt 334.441 ha ein.

Die modellierten THG-Einsparpotenziale zeigen deutliche Unterschiede zwischen den Kulturen und Szenarien. Unter der Annahme einer vollständigen Wiedervernässung und Bewirtschaftung mit Paludikultur der gut und mäßig geeigneten Flächen, ergibt sich ein potenzielles Einsparpotenzial von rund 15,16 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq a<sup>-1</sup>. Das größte Einsparpotenzial zeigte die Umstellung von Ackerflächen auf Nassnutzung mit Schilf oder Rohrkolben.

Die Ertragsmodellierungen zeigten, dass Schilf ab dem dritten Standjahr stabile Biomasseerträge liefert, die sich bei einer Winterernte leicht erhöhen. Rohrkolben reagiert sensibler auf den Wasserstand und erzielt die höchsten Erträge unter überstauten Bedingungen. Rohrglanzgras erreicht zwar geringere, dafür aber relativ stabile Erträge, wobei die Datenbasis hierfür derzeit noch als eingeschränkt belastbar gilt.

Der Deckungsbeitrag der im Wirtschaftsjahr 2022/2023 auf der identifizierten Potenzialfläche angebauten Kulturen betrug insgesamt rund 0,17 Mrd. EUR. Die Kosten für die Wiedervernässung dieser Fläche zum Anbau von Schilf und Rohrkolben wurden je nach Szenario auf 0,36 bis 5,87 Mrd. EUR geschätzt. Die Kosten für den Anbau von Schilf und Rohrkolben lagen in einer Spannweite von 1,03 bis 12,32 Mrd. EUR. Für die erzeugte Biomasse aus Paludikulturen wurden – unter Annahme unterschiedlicher Ertragsniveaus und Preise – Gesamtverkaufserlöse in Höhe von 0,59 bis 1,06 Mrd. EUR ermittelt.

### Wertschöpfungskettenanalyse

Die Ergebnisse der Wertschöpfungskettenanalyse zeigen unter anderem (1) die zentralen Voraussetzungen für die Produktion und Nutzung von Baustoffen aus Paludikulturen, (2) die erwarteten Kosten und Nutzen, (3) die ökonomischen Risiken, sowie (4) die Treiber und Hemmnisse in den einzelnen Stufen der Wertschöpfungskette. Als eine wesentliche Voraussetzung für die Entwicklung tragfähiger Wertschöpfungsketten wurde die kontinuierliche Bereitstellung kostengünstiger Paludikulturbiomasse in gleichbleibender Qualität identifiziert. Darüber hinaus müssen Baustoffe aus Paludikulturen für Nutzer verlässlich verfügbar sein, und Preisunterschiede zu konventionellen Baustoffen sollten moderat bleiben, um Marktakzeptanz zu erhöhen.

## SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass ein erheblicher Teil der landwirtschaftlich genutzten Moorflächen in Deutschland grundsätzlich für eine Wiedervernässung und die Nutzung mit Paludikulturen geeignet ist. Die Kombination aus standortbezogener Flächenbewertung, kulturartspezifischer Ertragsmodellierung und Treibhausgasbilanzierung zeigt, dass Paludikulturen einen wesentlichen Beitrag zur Minderung der Emissionen aus Moorböden leisten können. Flächen mit hoher Eignung sollten daher vorrangig in zukünftige Maßnahmen zur torferhaltenden Bewirtschaftung sowie in Demonstrationsvorhaben einbezogen werden. Eine gezielte Förderung standortangepasster Paludikulturen stellt einen entscheidenden Hebel dar, um den Klimaschutz im Moormanagement wirksam und praxisnah voranzubringen. Dabei bleibt eine fundierte und standortspezifische hydrologische und bodenkundliche Prüfung der Wiedervernässbarkeit der Flächen in jedem Einzelfall unerlässlich.

## AUSGEWÄHLTE VERÖFFENTLICHUNGEN

- JKI (2025): Landwirtschaftliche Potenzialflächen zur Wiedervernässung organischer Böden. Web-GIS-Viewer. <https://sf.julius-kuehn.de/mapviewer/mocor>
- Maaß O, Saltzmann J (2025): From rewetted peatlands to houses: Value chain analysis of building materials made of paludiculture. In: Book of Abstracts. 4th RRR conference on Renewable Resources from Wet and Rewetted Peatlands, 2025 September 23-26; Greifswald, Germany, p. 60. <https://rrr2025.com/files/doc/veranstaltungen/250922-RRR-ProgrammHeft-BookOfAbstract-corr.pdf>
- Bacher S, Golla B, Koltermann D, Langhof M, Maaß O, Saltzmann J (2024): Klimaschutz durch Paludikulturen auf wiedervernässten Moorstandorten. In: Tagungsband der Konferenz der Deutschen Agrarforschungsallianz (DAFA): Agrarforschung zum Klimawandel, 11.-14.03.2024; Potsdam

### Handlungsempfehlungen für Politik und Praxis

Für die Praxis ist es wichtig, bei der Planung und Umsetzung von Wiedervernässungsmaßnahmen die Besonderheiten der einzelnen Standorte zu berücksichtigen. Flächen mit hoher Eignung sollten vorrangig für Praxis- und Demonstrationsprojekte genutzt werden, um Wissenstransfer und Akzeptanz zu fördern.

Für die Politik empfiehlt sich, Förderinstrumente gezielt an den Klimaschutzbeitrag unterschiedlicher Flächentypen und Nutzungen zu koppeln. Zudem sollte die Datengrundlage zur Hydrologie und Torfmächtigkeit bundesweit harmonisiert werden, damit Entscheidungen über Wiedervernässungsmaßnahmen besser geplant und abgestimmt werden können. Der im Projekt erarbeitete Web-GIS-Viewer (<https://sf.julius-kuehn.de/mapviewer/mocor>) soll dazu einen Beitrag leisten.

Um die Wettbewerbsfähigkeit von Baustoffen aus Paludikulturen zu erhöhen, ist unter anderem eine Senkung der Produktionskosten erforderlich. Hierzu kann die Förderung technischer Innovationen, insbesondere zur Automatisierung und Substitution arbeitsintensiver Produktionsprozesse, beitragen. Darüber hinaus sind Informations- und Kommunikationsprogramme notwendig, um Nutzer über die verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten von Baustoffen aus Paludikulturen, deren klimaschutzbezogene Leistungsfähigkeit sowie deren Vor- und Nachteile aufzuklären.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Landwirtschaft, Ernährung  
und Heimat

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



### Roadmap zur Vernässung organischer Böden in Deutschland

**Bärbel Tiemeyer, Andrea Lange, Arndt Piayda, Bernhard Osterburg, Charlotte Schröder, Christoph Buschmann, Florian Heinrich, Jens Jetzkowitz, Johannes Wegmann, Lukas Guth, Malik Ar Rahiem, Olivier Hirschler, Sarah-Maria Schäffer, Thomas De Witte, Thorsten Uhl und Wiltrut Koppensteiner**

#### ZIELSETZUNG

Die Emissionen von Treibhausgasen (THG) aus Moorböden (kurz für Moor- und weitere organische Böden) betragen in Deutschland ca. 53 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq pro Jahr (UBA, 2025a). Nach der Bund-Länder-Zielvereinbarung (Bund und Länder, 2021) sollen diese Emissionen bis 2030 um 5 Mio. t CO<sub>2</sub> vermindert werden. Um die klimapolitischen Ziele des Bundes-Klimaschutzgesetzes für den Sektor Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forst (LULUCF) 2045 zu erreichen, müssen sie noch drastischer gesenkt werden. Dies ist mit aktuellen Maßnahmen, der verfügbaren Finanzierung und unter den geltenden Rahmenbedingungen nicht zu erreichen (UBA, 2025b). Um die Emissionen zu minimieren, müssen Moorböden großflächig vernässt werden. Die bisherige, trockene Landnutzung ist dann nicht mehr möglich. Um die Vernässung voranzubringen, stellen sich für die Politik hochkomplexe Fragen zur Gestaltung, Umsetzung, Machbarkeit und Akzeptanz der gewünschten Transformation der Landnutzung.

Vor diesem Hintergrund hatte das Projekt RoVer das Ziel, ein Umsetzungskonzept zur Vernässung der Moorböden in Deutschland zu entwickeln. Dazu wurden verschiedene politische Handlungsszenarien mit spezifischen Schwerpunktsetzungen bezüglich Vernässung und nasser Nutzung entwickelt und deren Auswirkungen modelliert. Jedes dieser Szenarien berücksichtigte dabei die relevanten Aspekte Bodenkunde, Hydrologie, THG-Emissionen, Ökonomie, Raumplanung, Recht und Soziologie. Die Analysen und Modellierungen wurden deutschlandweit, räumlich explizit, zeitlich diskretisiert und möglichst standortspezifisch durchgeführt.

#### METHODIK

Die Roadmap wurde in einer interdisziplinären Zusammenarbeit entwickelt. Die administrativen und rechtlichen Rahmenbedingungen wurden analysiert und Verbesserungsvorschläge entwickelt. Die gesellschaftlichen Diskurse um die Vernässung von Moorböden wurden anhand einer Analyse von Zeitungsartikeln durch Themenmodellierung sowie Tiefeninterviews mit Landwirt\*innen und Behörden untersucht. Um zu bewerten, inwieweit eine Fläche sich kostengünstig und schnell vernässen lassen kann, wurden aufbauend auf Tiemeyer et al. (2017) und Koppensteiner et al. (2023) bodenkundliche, öko-hydrologische und räumlich-rechtliche Eignungskulissen entwickelt. Für die Status quo-Analyse der Landnutzung auf Moorböden und die Berechnung der Einkommensverluste wurden die Daten aus 2020 des Integrierten Verwaltungs- und Kontrollsystems (InVeKoS)<sup>1</sup> und die Agraratlasdaten für Schleswig-Holstein

#### HIGHLIGHTS

- Nach ersten Ergebnissen belaufen sich die Vermeidungskosten durch Vernässung auf 8-60 €/t CO<sub>2</sub>-Äq, mit einer höheren Effizienz bei Vollvernässung und Restaurierung als bei Teilvernässung und Extensivierung.
- Landnutzer\*innen sollten als aktive Gestalter der Landnutzungstransformation verstanden und einbezogen werden.
- Die erarbeiteten Eignungskarten für nasse Landnutzungsoptionen, basierend auf umfassenden Indikatorensets, stehen zur Nutzung und Unterstützung der Transformation bereit.

genutzt, da InVeKoS Betriebsinformationen von SH nicht zur Nutzung freigegeben wurden (Neuenfeldt et al., 2022). Um die Einkommensverluste durch Vernässung zu berechnen, wurden Modellbetriebe entwickelt und Anpassungskosten durch lineare Programmierung modelliert (Buschmann et al., 2025). Die Wirtschaftlichkeitsberechnung der alternativen Landnutzungsoptionen erfolgte durch Produktionsmodelle basierend auf Experteninterviews, Literatur und Daten des Kuratoriums für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL). Kostenkomponenten für die Vernässung von Flächen wurden durch ein Planungsbüro systematisch erfasst (Heinrich et al., 2025). Für die Berechnung der THG-Emissionen wurde das Modell des deutschen THG-Inventars benutzt. Im Rahmen des Projekts wurde die Inventarmethodik durch verbesserte Emissionsfaktoren für naturnahe und extensiv genutzte Flächen ergänzt.

Aus den verschiedenen Datenquellen wurde ein räumlich explizites Modell auf Basis des Rasters des THG-Inventars (Zellgröße: 1 ha) entwickelt, um die Landnutzungstransformation entsprechend der politischen Handlungsszenarien bis 2045 zu modellieren. Als Kulisse wurde die aktualisierte Kulisse organischer Böden (Wittnebel et al., 2023), aufbereitet für die Berichterstattung (Frank et al., 2025), genutzt. Als alternative, nasse Landnutzungsoptionen wurden „Vollvernässung mit Restaurierung (Nutzungsaufgabe)“, „Teilvernässung mit Extensivierung“, „Anbau-Paludikultur auf Hochmoorböden“, „Anbau-Paludikultur auf Niedermoorböden“, „Nasswiesen auf Niedermoorböden“ und „Moor-Photovoltaik“ betrachtet.

<sup>1</sup> InVeKoS Daten der Landnutzung aus 2020 für Brandenburg und Berlin, verarbeitet für das Projekt "Moorschutz" am Thünen Institut; InVeKoS Daten der Landnutzung aus 2020 für Bayern, Niedersachsen und Bremen, Mecklenburg-Vorpommern, verarbeitet für das Projekt

"RoVer" am Thünen Institut; InVeKoS Daten der Landnutzung aus 2023 für Schleswig-Holstein ohne Betriebsinformationen: © GeoBasis-DE/LVermGeo SH/CC BY 4.0, verarbeitet für das Projekt "RoVer" am Thünen Institut

## KLIMAWIRKUNG

Durch Änderung der Landnutzung auf Moorböden von entwässerungsbasierter Landwirtschaft hin zu nasser Nutzung und Restaurierung lassen sich je nach Standort 20 bis 30 t CO<sub>2</sub>-Äq./ha p. a. bodenbürtiger Emissionen im LULUCF-Sektor einsparen. Bei einer Flächenkulisse von 1,8 Mio. ha (ohne Siedlung) ergibt sich damit ein herausragendes Einsparpotenzial.

Die Entfaltung dieses Potenzials muss gesamtgesellschaftlich getragen werden und kann nur unter Berücksichtigung der Belastungen für die Betroffenen geschehen. Durch ökonomisch tragfähige Landnutzungsalternativen und abgestimmte Förderung kann diese Transformation gelingen.

## ERGEBNISSE

### Treibhausgasemissionen

Zur räumlich differenzierten Bewertung der THG-Emissionen feuchter bis nasser Standorte wurde eine umfangreiche Literaturrecherche durchgeführt und Emissionsfaktoren (EF) abgeleitet, die sowohl Informationen zur Vegetation (Biotoptypen) als auch Moorbwasserstände berücksichtigen. Diese EF können nun dank eines harmonisierten Biotop-typen-Datensatzes angewendet werden. Die aggregierten EF (Abb. 1) enthalten auch Daten zu teilvernässten Standorten. Emissionen nasser Standorte mit moortypischer Vegetation oder auch Anbaupaludikulturen auf Niedermoor (Bockermann et al., 2025, nicht in Abb. 1 enthalten) können deutlich niedriger sein bzw. eine THG-Senke darstellen.

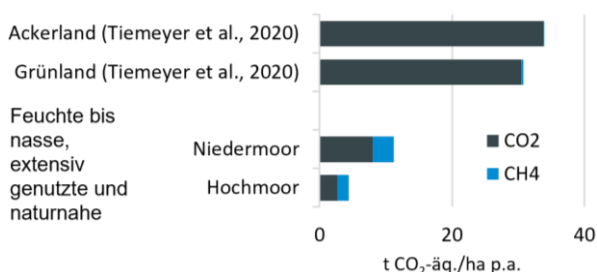


Abbildung 1: Aggregierte Emissionsfaktoren für Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) und Methan (CH<sub>4</sub>) feuchter bis nasser entweder extensiv genutzter oder naturnaher Flächen (Mittelwert der ausdifferenzierten Vegetationstypen) für Offenland im Vergleich zu Acker und Grünland nach Tiemeyer et al. (2020).

### Status-Quo der Landwirtschaft und Einkommensverluste durch Vernässung

Die landwirtschaftlich genutzten Moorböden in den moorreichen Bundesländern (BB, BY, MV, NI, SH) werden vorrangig als Dauergrünland genutzt (ca. 626.500 ha, bzw. 70 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche (LF) auf Moorböden). Auf Ackerland dominieren Silomais (ca. 62.500 ha, bzw. 11,6 %) und Getreide (45.000 ha, bzw. 8,4 %). Ca. 66.100 bzw. 40 % der Betriebe in den moorreichen Bundesländern wirtschaften auf insgesamt 901.500 ha Moorböden (ohne SH, da hierfür keine Betriebsinformationen). Dabei ist der Moorbodenanteil je Betrieb sehr unterschiedlich. 189.000 ha der Kulisse werden von ca. 5.560 Betrieben mit einem Moorbodenanteil von 50-75 % bewirtschaftet und 162.000 ha von ca. 5.770 Betrieben

mit einem Moorbodenanteil von mehr als 75 %. Die restlichen Moorböden werden von Betrieben bewirtschaftet, deren Moorbodenanteil weniger als 50 % der Betriebsfläche ausmacht.

Die berechneten Einkommensverluste durch die „Vollvernässung und Restaurierung“ (also Nutzungsaufgabe) unterscheiden sich stark in Abhängigkeit vom Betriebstyp, dem Vorhandensein von Anpassungsflächen (Ersatz für wegfallende Futterfläche) und dem Moorbodenanteil an der Betriebsfläche. So streuen die Einkommensverluste bspw. in NI zwischen 143 €/ha p. a. (extensiver Rinderbetrieb mit geringem Moorbodenanteil) und 2.250 €/ha p. a. (großer Milchviehbetrieb mit hohem Moorbodenanteil). Auch regional bestehen große Unterschiede. Abbildung 2 zeigt für die moorreichen Bundesländer die durchschnittlichen Einkommensverluste pro ha p. a. je Naturraum nach BfN (2022). Aus der Vernässung resultierende Wertverluste der Flächen sind in den Einkommensverlusten nicht enthalten.

Multipliziert man die Einkommensverluste pro ha mit den betroffenen Betriebsflächen für die moorreichen Bundesländer (ohne SH)<sup>2</sup> ergibt sich eine Gesamtsumme von 533 Mio. € pro Jahr. Dies bezieht sich nur auf die landwirtschaftlich genutzten Flächen von Betrieben mit Rinderhaltung, die GAP-Zahlungen erhalten. Regionale Anpassungen wie Flächentausch, sind dabei noch nicht berücksichtigt.

Betrachtet man die Vermeidungskosten in € pro eingesparter Tonne CO<sub>2</sub>-Äq, so bestehen auch hier große regionale Unterschiede. Die durchschnittlichen Vermeidungskosten pro Naturraum bewegen sich in BB und MV zwischen 8-13 €/t, in NI betragen sie bis zu 60 €/t.

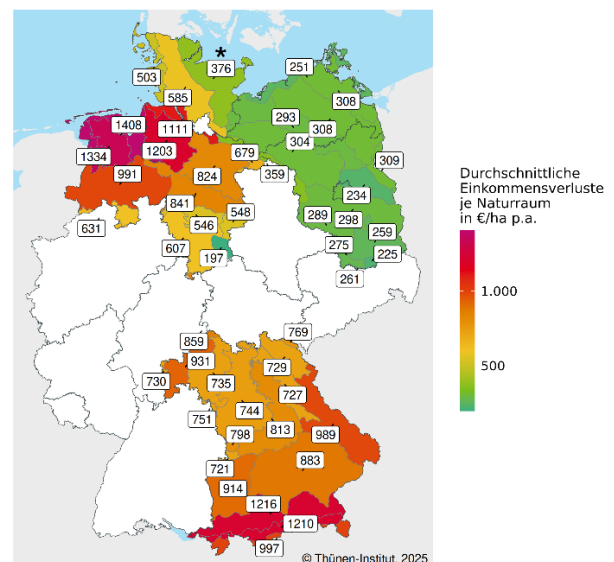


Abbildung 2: Einkommensverluste durch Vollvernässung auf der Basis von Modellbetriebsberechnungen. \*Für Schleswig-Holstein wurden die Berechnungen auf Gemeindeebene durchgeführt. Die Ergebnisse sind daher nicht direkt vergleichbar. Alle Ergebnisse wurden pro Naturraum gemittelt

Die „Teilvernässung und Extensivierung“ verursacht weniger Einkommensverluste (€/ha p. a.), da die Flächen weiterhin von der konventionellen Landwirtschaft genutzt werden können. Allerdings sind die Vermeidungskosten (€/t CO<sub>2</sub>-Äq)

höher als bei der Vollvernässung, weil die betrieblichen Produktionsmöglichkeiten eingeschränkt werden, die eingesparten Emissionen aber vergleichsweise gering sind (berechnet mit impliziten EF konform zur aktuellen Berichterstattung).

### Soziologie der Transformation

Die Vernässung von Moorböden ist eine zentrale Voraussetzung für die Transformation des derzeit noch auf Entwässerung ausgerichteten, landwirtschaftlichen Systems im Sinne des Klimaschutzes. Besonders betroffen sind Menschen in Moorregionen – vor allem Landwirt\*innen, die eigene oder gepachtete Flächen bewirtschaften. Sie sind die entscheidenden Akteur\*innen, die den Wandel zu einer Wertschöpfung mit nassen Moorböden werden bewerkstelligen müssen. Diese Gruppe ist in umfassende, gesellschaftliche Diskurse eingebunden: Seit den 2010er Jahren erzeugt die öffentliche Diskussion über Klimaschutz durch Moorvernässung zunehmend Druck auf Landwirt\*innen. Vorausgegangen ist ein markanter Diskurswandel. Denn mit der Erkenntnis, dass Moorbodenschutz zugleich Klimaschutz ist, geht nun die Forderung einher, sämtliche Moorflächen zu vernässen – nicht mehr nur einzelne Standorte für den Naturschutz. Alternative Landnutzungen zur Wertschöpfung auf nassen Moorböden verharren bisher in Nischen. In den Moorregionen erzeugt diese Forderung zur Vernässung jedoch Unsicherheit und Ablehnung. Landwirt\*innen drücken ein Gefühl der Fremdbestimmung durch „die Geschichte mit dem Moor“ (Zitat eines Landwirts) aus. Auch wenn die Betroffenen eine gewisse emotionale Verbundenheit mit der derzeitigen, auf Drainage basierten, landwirtschaftlichen Praxis zeigen, sind sie nicht veränderungsresistent. In Interviews äußern Landwirt\*innen den Wunsch nach einer Planung vor Ort. Sie möchten als Expert\*innen ihrer Flächen an Erhebungs-, Planungs- und Entscheidungsprozessen beteiligt werden.

### Kosten und Wirtschaftlichkeit der alternativen Landnutzungen

Die Vernässungskosten und die Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Landnutzungsoptionen wurden in Abhängigkeit von Flächengröße und der Ausgangsbedingungen modelliert. Potenzielle Skaleneffekte bei großflächiger Umsetzung und die Auswirkungen des technologischen Fortschritts wurden in den Berechnungen berücksichtigt, um Kostenschätzungen für zukünftige Projekte zu ermöglichen. Die ermittelten Kosten (Planung und Bau) für eine Vollvernässung mit mittlerem Wasserstand von 10 cm unter Flur reichen von rund 4.700 €/ha bis 34.700 €/ha. Die Kosten für eine Teilvernässung liegen deutlich darunter und beginnen bei 268 €/ha.

Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit können die Paludikultur-Optionen unter derzeitigen Bedingungen nicht kostendeckend betrieben werden. Eine positive Wirtschaftlichkeit ist in der Regel nur unter der Voraussetzung gesicherter Abnahmebedingungen für eine stoffliche Nutzung erreichbar. Entsprechende Wertschöpfungsketten befinden sich jedoch noch in einer frühen Entwicklungsphase und sind bisher nur in Ausnahmefällen etabliert.

Moor-PV als Nutzungsoption wurde ebenso ökonomisch untersucht. Im Vergleich zu konventionellen Freiflächenanlagen sind aufgrund spezifischer technischer Anforderungen, wasserbaulicher Maßnahmen und eines höheren Installationsaufwands Mehrkosten zu erwarten. Dennoch gibt es Standorte, an denen Moor-PV rentabel betrieben werden kann. Dies sind vor allem größere Standorte mit geringer Torfmächtigkeit, da zum einen von erheblichen Skaleneffekten auszugehen ist und zum anderen die notwendigen Zusatzkosten von Moor-PV auf flachgründigen Standorten vergleichsweise gering sind.

### Eignung für die Transformation

Um die standörtliche Eignung für die betrachteten Landnutzungsoptionen zu bewerten, wurden insgesamt vier bodenkundliche, elf öko-hydrologische und zehn raumordnerisch-rechtliche Indikatoren identifiziert und berechnet. Als Beispiel ist in Abbildung 3 die Gesamteignung zur „Vollvernässung und Restaurierung“ dargestellt.

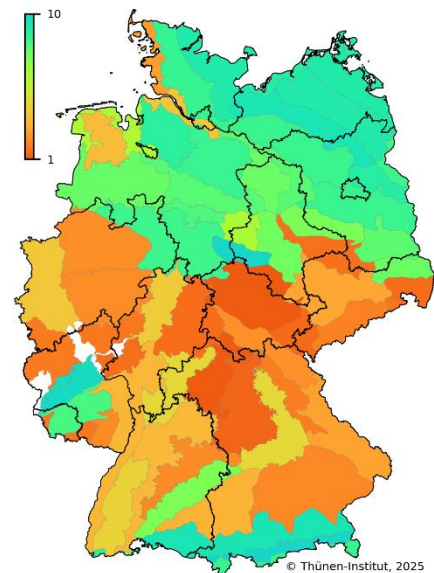


Abbildung 3: Gesamteignung für die Landnutzungsoption „Vollvernässung mit Restaurierung“, aggregiert vom Raster des THG-Inventars auf Naturräume. 1 entspricht einer herausfordernden und 10 einer günstigen Eignung.

Aus diesen Eignungskarten wird für die Szenarienmodellierung hergeleitet, auf welchen Flächen welche alternativen Landnutzungsoptionen möglich und wie hoch die Vernässungs- und ggf. Etablierungskosten sind.

### Rechtliche und administrative Aspekte

Die Analysen der aktuellen Rahmenbedingungen zeigen deutlich, dass ein fachgesetzlicher Moorgebietsschutz z. B. durch Ergänzung im Wasserhaushaltsgesetz nötig ist, um Ausweisung und Schutz der Moorböden, Moorgebietsentwicklungsplanung und Entwicklung von Verfahrensstandards für die flächendeckende Vernässung rechtlich zu verankern. Die umfassende Vernässung von Moorböden würde durch den Status des überragenden öffentlichen Interesses unterstützt, so dass ein Abwägungsvorrang entsteht. Diese Aufgaben sollten im Moorgebiet von einer Moorschutzbehörde (Zweckverband) mit interdisziplinärem Team übernommen werden. Eine unabhängige Kommunikations- und Moormediationsstelle sollte diese unterstützen. Die

Behörde plant die großflächige Vernässung, bereitet die Genehmigungen vor und setzt um.

Benötigte Tauschflächen sollten über einen Moorflächenfonds mit Flächenpool strategisch eingesetzt und Moorflurbereinigungsverfahren durch Bündelung von Schritten beschleunigt werden. Moorgemeinschaften (Genossenschaften) könnten alle Beteiligten einer Region bündeln, Flächen einbringen, Arbeitsleistung, Kapital, Maschinen und Dienstleistungen zusammen nutzen und gemeinsame Wertschöpfungsketten für Moor PV und Paludikultur aufbauen.

Die Moorförderprogramme sollten über einen Moorklimaschutzfonds in der GAK zusammengeführt und in den Mooren regional koordiniert werden. Weiterhin sollten klimaschädliche Subventionen, z. B. die GAP Flächenprämie, schrittweise für entwässerte Moorböden auslaufen zu Gunsten einer steigenden Förderung von Paludikultur. Ein Moorzertifikatsabgabesystem könnte einen linearen Emissionsreduktionspfad (von 2030 bis 2045) sichern.

### Modellierung der Szenarien

Um die Transformation der Landnutzung auf Moorböden zu modellieren, wurden die Daten und Modelle zu Einkommensverlusten in der Landwirtschaft, Eignung der Vernässung, Wirtschaftlichkeit alternativer Landnutzungsoptionen, z. B. zur Rentabilität von Moor-PV Anlagen (Abb. 4), und THG-Emissionen vereint.

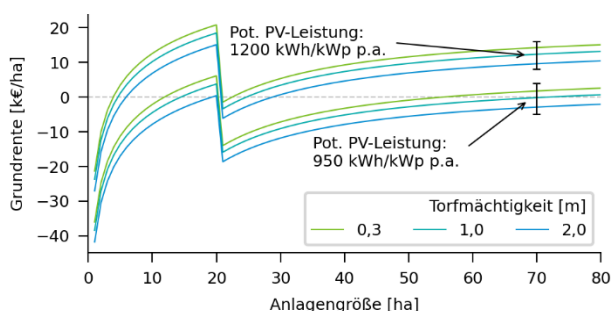


Abbildung 4: Rentabilität von Moor-PV Anlagen in Abhängigkeit der Torfmächtigkeit, Pot. PV-Leistung und Größe der Anlage (EEG-Einspeisevergütung: 5,3 ct/kWh inkl. 0,5 ct/kWh Moor-PV Zulage bis Anlagengröße von 20 ha, PPA-Vergütung: 4,8 ct/kWh, ermittelt aus eigenen Datenerhebungen).

Aus dem Status quo entwickelt sich so jährlich bis 2045 räumlich explizit die Landnutzung je nach Standorteigenschaften. Die Transformation jedes einzelnen Hektars vollzieht sich dabei immer als Teil einer größeren

Maßnahmenfläche, die nach optimalen, ökonomischen Kriterien verortet und dimensioniert wurde.

Anhand dieses Modells werden sechs verschiedene, politische Handlungsszenarien getestet, deren Ergebnisse noch verglichen und mit Akteuren diskutiert werden müssen. Die Szenarien unterscheiden sich bezüglich der Gewichtung der angenommenen Maßnahmen durch die Anpassung der räumlich-rechtlichen Indikatoren und finanziellen Anreize, welche die Wirtschaftlichkeit beeinflussen. Die Szenarien (1) Mit-Maßnahmen (MMS) und (2) Mit-Weiteren-Maßnahmen (MWMS) stellen hier eine Baseline dar, die an die Grundlagen des nationalen Projektionsberichts 2025 angelehnt ist. Mit den Szenarien (3) „Naturschutz“, (4) „Paludikultur“ und (5) „Moor-PV“ wird ein starker Aufbau der Moorschutzpolitik angenommen, mit dem Schwerpunkt auf die Unterstützung der jeweiligen Landnutzungsoptionen Vollvernässung und Restaurierung, Paludikultur und Moor-PV. Im Szenario (6) „Emissionsabgabe mit Subvention“ wird ein Zertifikatabgabesystem für die Emissionen aus Moorböden umgesetzt, dass einem festgelegten Emissionsreduktionspfad folgt. Abschließend werden die adressierten Vernässungsflächen, THG-Einsparungen und Minderungskosten der Szenarien gegenübergestellt.

### AUSGEWÄHLTE VERÖFFENTLICHUNGEN

- Uhl et al. (2024): Moore in der Raumordnung - Bedeutung des Instruments Raumordnung für den Moorbodenschutz am Beispiel Mecklenburg-Vorpommern, GMC-Schriftenreihe.
- Schröder & Jetzkowitz (accepted): How Does Regionality Influence Meaning Structures Concerning Peatland Rewetting in Germany? A Structural Topic Modeling (STM) Approach to Understanding the Discourse on a large-scale Climate Protection Measure, Nature and Culture.
- Guth et al. (in review): Vegetation and water level-dependent emission factors for moist to wet bog peatlands in Germany, Ecological Indicators
- Wetjen et al. (in prep.): Cost structure of ground-mounted photovoltaic systems on rewetted peatlands—A German case study, Journal of Environmental Management

Weitere Informationen: [Link zur RoVer-Website](#)

### HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN FÜR POLITIK UND PRAXIS

Die umfassende Vernässung von Moorböden bietet bei einer betroffenen Fläche von lediglich 5,4 % Deutschlands ein erhebliches THG-Einsparpotenzial zu teils geringen Vermeidungskosten. Die Nutzung dieses Potenzials ist unumgänglich, wenn die notwendigen Emissionsminderungen in erreichbare Nähe rücken sollen. Die Bereitstellung von Fördermitteln hat in jüngster Zeit zugenommen, reicht jedoch noch nicht als Transformationsanreiz aus. Die Maßnahmenumsetzung bleibt bisher weit hinter der notwendigen Geschwindigkeit zurück, vor allem da bisher nur begrenzt Verbesserungen der institutionellen und rechtlichen Rahmenbedingungen stattfanden und eine erfolgreiche Beteiligung der lokalen Akteur\*innen nicht erreicht wurde. Hier besteht für die Politik akuter Handlungsbedarf, welcher durch die Ergebnisse dieses Vorhabens unterstützt werden kann.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Landwirtschaft, Ernährung  
und Heimat

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



### Anreizwirkungen, Akzeptanz und Klimawirksamkeit unterschiedlicher Honorierungsoptionen für den Klimaschutz in der Waldwirtschaft

Marlen Brinkord, Björn Seintsch; David Schicketanz und Peter Elsasser

#### ZIELSETZUNG

Ziel des Projektes war es, die Wirksamkeit der Honorierung von Klimaschutz- und Klimaanpassungsmaßnahmen im Wald zu ermitteln. Dazu wurde ergründet, inwieweit Waldbesitzer auf entsprechende Förderangebote eingehen, wie stark sie dabei auf finanzielle Anreize reagieren, und wie ihre Umsetzungsbereitschaft gesteigert werden könnte.

Dies bot die Basis für Schätzungen, welches Flächenpotenzial die Förderung forstlicher Maßnahmen insgesamt hat, welche Klimaschutzwirkung damit möglich ist und wie sich diese im Zeitverlauf entwickelt, und schließlich, welche betrieblichen Umsetzungskosten damit verbunden sein können – eine notwendige Voraussetzung, um die Förderung möglichst effizient gestalten zu können.

#### METHODIK

Die Klimaschutzleistung von Wäldern fußt auf ihrer Fähigkeit, im Zuge des Baumwachstums  $\text{CO}_2$  aus der Luft aufzunehmen und längerfristig zu speichern.

Es wurden daher vorhandene Waldwachstumsmodelle – hier: forstliche Ertragstafeln – so aufbereitet, dass sie zusätzlich zur oberirdischen Derbholzmasse die Entwicklung der gesamten Baumbiomasse über dem Bestandsalter ausweisen, und darüber hinaus auch den dort gespeicherten Kohlenstoff – einschließlich des Jugendstadiums der Bestände, welches in traditionellen Ertragstafeln nicht abgebildet wird. Die Berechnung des Kohlenstoffgehaltes und seine Umrechnung in  $\text{CO}_2$  folgten dabei den internationalen Berechnungsvorgaben, wie sie auch für die nationalen Inventarberichte zum deutschen Treibhausgasinventar verbindlich sind.

Darauf aufbauend wurde untersucht, wie sich die Umsetzung des Förderprogramms „Klimaangepasstes Waldmanagement“ in typischen Modellforstbetrieben auf die Kohlenstoffspeicherung und die Opportunitätskosten in der Rohholzerzeugung auswirkt. Zu diesem Zweck wurde mit Hilfe des forstökonomischen Simulationsmodells FESIM verglichen, wie sich Wachstum und Erträge über die nächsten 200 Jahre in Betrieben entwickeln, die entweder die zwölf Maßnahmen des Förderprogramms umsetzen oder nicht. Die Untersuchung erfolgte in Fünf-Jahres-Schritten an drei Modellbetrieben: je ein Fichten-, Kiefern- und Laubholzdominierten Betriebstyp. Die benötigten Inputdaten stammen aus dem Testbetriebsnetz Forst des BMLEH; für die Entwicklung der Kohlenstoffvorräte wurden die oben beschriebenen Kohlenstoff-Ertragstafeln in FESIM integriert.

In einem weiteren Arbeitsschritt kamen schließlich die Grundeigentümer selbst zu Wort. In mehreren Befragungen wurde ermittelt, wieweit sie überhaupt bereit sind, bestimmte Wald-Klimaschutzmaßnahmen umzusetzen, welche Honorierung sie dafür erwarten („willingness to accept“) und wie stark die Honorierung sowie weitere Faktoren ihre Umsetzungsbereitschaft beeinflussen. Die Befragungen

#### HIGHLIGHTS

- Unsere Kohlenstoff-Ertragstafeln bieten Politik und Forstpraxis Kalkulationshilfen, um Kohlenstoffbindung und -speicherung in der Baumbiomasse im Zeitverlauf IPCC-kompatibel abzuschätzen.
- Das Förderprogramm „Klimaangepasstes Waldmanagement“ zeigt unterschiedliche Klimaschutzwirkungen: Neben klimawirksamen (aber kosten-trächtigen) Maßnahmen fördert es auch weniger effektive und sogar kontraproduktive Maßnahmen.
- Erstaufforstung, Stilllegung alter Laubbaumbestände und wüchsige Gastbaumarten kommen nicht für alle Grundeigentümer in Frage, teils wegen grundsätzlicher Vorbehalte, teils mangels entsprechender Flächen. Dennoch gibt es ein nennenswertes Flächenpotenzial für jede Maßnahme.

richteten sich an private und kommunale Waldeigentümer sowie an private Landwirte. Gefragt wurde nach Holznutzungsverzicht auf Teilen der Waldfläche, nach dem Anbau schnellwüchsiger Gastbaumarten sowie der Erstaufforstung bisher landwirtschaftlich genutzter Flächen.

#### ERGEBNISSE

Das erste Ergebnis sind zwei Sätze von Kohlenstoff-ertragstafeln: einerseits basierend auf der traditionellen SCHÖBER-Ertragstafelsammlung und andererseits auf den Ertragstafeln der 4. Generation nach [Albert et al. \(2024\)](#). Diese Ertragstafeln wurden für Buche, Eiche, Fichte, Kiefer und Douglasie erstellt, jeweils für verschiedene Ertragsklassen und beginnend im Alter von einem Jahr, wodurch auch die Jugendphase von Waldbeständen abgebildet wird. Ein Vergleich mit Schätzungen auf Basis traditioneller Expansionsfaktoren zeigte, dass diese den Kohlenstoffgehalt in Waldbeständen im Vergleich zu unseren Ergebnissen deutlich überschätzen – um etwa 20-35 %, wobei die Abweichungen für Altbestände größer sind.

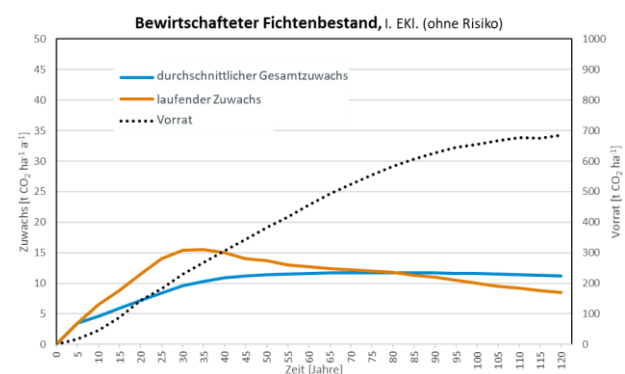


Abbildung 1: Kohlenstoffspeicherung am Beispiel Fichte (nach Kohlenstoff-Ertragstafel Brinkord et al. 2024)

## KLIMAWIRKUNG

Kohlenstoffbindung setzt bereits bei jungen Wäldern ein, ist aber sehr altersabhängig und entfaltet sich erst später voll. Das Förderprogramm „Klimaangepasstes Waldmanagement“ enthält einige Kriterien, die sich eher durch Anpassungs- sowie Naturschutzziele als mit dem Klimaschutz rechtfertigen lassen. Einzelne Maßnahmen (z. B. Erstaufforstungen, Nutzungsverzichte) haben substantielles Klimaschutzpotenzial, auch wenn dieses z.T. betrieblichen und rechtlichen Restriktionen unterliegt.

Klimawirkungen hängen aber auch von Holzverwendung und -handel ab. Eine rein sektorale Betrachtung spiegelt sie nur unvollständig wider.

Die Wirkung des Förderprogramms „Klimaangepasstes Waldmanagement“ auf Opportunitätskosten und Kohlenstoffspeicherung variiert stark je nach Ausgangslage des Betriebs, insbesondere der Baumartenausstattung, und verändert sich über die Zeit. Drei der zwölf Programmkriterien zeigen langfristig keinen Einfluss auf Opportunitätskosten und Kohlenstoffspeicherung (K1 Vorausverjüngung, K2 natürliche, K3 künstliche Verjüngung). Ähnliches gilt für den Verzicht auf Düngung und Pflanzenschutz (K10), die in deutschen Wäldern ohnehin unüblich sind. Andere Kriterien wie K5 (Mischbestände) und K9 (erweiterte Rückegassenabstände) verursachen Kosten bei fraglicher Klimawirkung. Die Bestandeswiederbegründung nach Kalamitäten durch Sukzession spart zunächst Kosten, führt aber langfristig zu geringerer Kohlenstoffspeicherung und hohen Opportunitätskosten. Flächenräumungsverzicht nach Kalamitäten (K6), Totholzanreicherung (K7), Habitatbaum-Erhalt (K8) und Holznutzungsverzicht (K12) erhöhen zwar die Kosten, fördern aber auch die Kohlenstoffspeicherung. Die Wiedervernässung (K11) erweist sich als teuer und kann den Kohlenstoffspeicher im Holzvorrat sogar reduzieren.

Laut der Eigentümerbefragung ziehen nur rund ein Drittel der Landwirt\*innen Aufforstungen grundsätzlich in Betracht; bei entsprechender Förderung wären sie bereit, im Schnitt 4,5 % ihrer Fläche (bei Ø-Betriebsgröße von 60 ha) bereitzustellen. Etwa 47 % der befragten Privatwaldbesitzer verfügen über alte Laubwaldbestände; zwei Drittel davon würden je ~3 ha zur Stilllegung bereitstellen. 65 % haben Wiederaufforstungsflächen (Ø 5 ha), von denen über die Hälfte für wüchsige Gastbaumarten in Frage käme.

## Handlungsempfehlungen für Politik und Praxis

Für eine nachhaltige Waldklimapolitik müssen die langfristigen Auswirkungen heutiger Entscheidungen berücksichtigt werden, die sich über Jahrzehnte bis Jahrhunderte erstrecken können. Der Anpassung der Wälder an den Klimawandel kommt dabei eine Schlüsselrolle zu, um überhaupt das Überleben der Wälder zu sichern, und damit letztlich auch ihre Klimaschutzleistung. Eine Fokussierung allein auf die Sektorziele des deutschen Klimaschutzgesetzes begünstigt dagegen Fehlentscheidungen, da es die Aufmerksamkeit auf kurzfristige Ziele bis 2045 richtet, den Sektor isoliert betrachtet und die Klimaanpassung der Wälder zugunsten der Klimaschutzleistung vernachlässigt.

Weiterentwickelte Förderprogramme sollten gezielt auf diejenigen Wälder ausgerichtet werden, in denen hoher Anpassungsbedarf besteht – das dient langfristig auch dem Klimaschutz. Auch die Förderung eigentlicher Klimaschutzmaßnahmen in den Wäldern sollte im Interesse eines verantwortlichen Mitteleinsatzes auf Maßnahmen mit hohem Wirksamkeitspotenzial konzentriert werden.

## SCHLUSSFOLGERUNGEN

Zur Stärkung des Klimaschutzes durch/im Wald stehen unterschiedlich wirksame Maßnahmen zur Verfügung. Es erscheint jedoch ausgeschlossen, die Sektorziele des Klimaschutzgesetzes durch Waldmaßnahmen zu erreichen. Zudem darf darüber nicht die notwendige Anpassung der Wälder an den Klimawandel vernachlässigt werden, die Voraussetzung auch für einen dauerhaften Klimaschutz durch Wald ist.

## AUSGEWÄHLTE VERÖFFENTLICHUNGEN

- Brinkord M, Elsasser P, Seintsch B (2024): Hilfstabellen zur Abschätzung der Kohlenstoffspeicherung in Waldbeständen ("Kohlenstoff-Ertragstabellen"). Thünen Working Paper 239, doi. 10.3220/WP1715581744000
- Brinkord M, Seintsch B, Elsasser P (2025): CO<sub>2</sub> Estimation of Tree Biomass in Forest Stands: A Simple and IPCC-Compliant Approach. Forests 16 (10), 1580, doi. 10.3390/f16101580
- Elsasser P (2025): Wälder und Forstwirtschaft in der Klimapolitik: Chance oder Risiko? Land, S. 47-51
- Brinkord M, Regelman C (eingereicht): Quantifying the Opportunity Costs and Additional CO<sub>2</sub> Sequestration Potential of a Climate Adaptation Programme in Central European Forest Enterprises.
- Schicketanz D, Elsasser P (in Vorbereitung): Acceptance of Afforestation Programs by Farmland Owners for Carbon Sequestration.

*Hinweis: Einige Ergebnisse sind vorläufig; konsolidierte Ergebnisse finden sich in den Veröffentlichungen*

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Landwirtschaft, Ernährung  
und Heimat

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

### Bewertung von Begasungs- und alternativen Behandlungsverfahren von Rundholz unter Vermeidung der klimaschädlichen Wirkung von Sulfurylfluorid

Björn Hoppe, Nadine Bräsicke, Garnet Marlen Kroos, Stephanie Feltgen, Maurice Kayka und Sibylle Kümritz (Julius Kühn-Institut); Jochen Trautner, Jan T. Benthien und Gesa Weber (Thünen-Institut)

#### ZIELSETZUNG

Projektziel war es, Wissen zu schaffen, auf dessen Basis eine Verringerung klimarelevanter Emissionen bei der phytosanitären Behandlung von Rundholz für den Export nach China vorgenommen werden kann.

Vor diesem Hintergrund galt es: (1) die Wirksamkeit von Quarantäne-Preshipment-Behandlungen (QPS) mit Sulfurylfluorid ( $\text{SO}_2\text{F}_2$ )-haltigen Pflanzenschutzmitteln unter Praxisbedingungen zu untersuchen, (2) das Einsparpotenzial bei Emissionen des klimarelevanten Gases durch Methoden Anpassungen auszuloten (Verfahrensoptimierung, Abluftfilterung), (3) chemische Alternativen zu betrachten ( $\text{PH}_3$ -haltige/freisetzende PSM, EDN), und deren Möglichkeiten und Grenzen aufzuzeigen, (4) alternative Behandlungsverfahren experimentell zu untersuchen und zu validieren, insbesondere Wärmebehandlungen (Dampf und trockene Luft), Wasserlagerung, modifizierte Atmosphäre ( $\text{N}_2/\text{CO}_2$ ) sowie deren Kombinationen, (5)  $\text{CO}_2$ -Äquivalente als Bezugsgröße für die Bewertung von Alternativen zu  $\text{SO}_2\text{F}_2$  hinsichtlich der Treibhausgasbilanz zu definieren und ausgewählte Alternativen daran zu bewerten, (6) das Wirk- und Nebeneffektspektrum der Methoden mittels Mikrobiomanalysen zu untersuchen sowie (7) die Wirtschaftlichkeit der Methoden zu prüfen und daraus praxisnahe Empfehlungen abzuleiten.

#### METHODIK

**Laborversuche mit  $\text{SO}_2\text{F}_2$ :** Die Wirksamkeit der Begasung mit dem einzig in Deutschland für Rundholz zur Verschiffung zugelassenen Pflanzenschutzmittel ProFume ( $\text{SO}_2\text{F}_2$ ) wurde zunächst in Laborversuchen gegen adulte Borkenkäfer ohne Matrix in Gazebehältern untersucht. In einer gasdichten Druck-Vakuumkammer wurde die Wirksamkeit gegen verschiedene Entwicklungsstadien durch Begasungen von Kupferstecher (*Pityogenes chalcographus*) befallenen Stammholzstücken aus der Zucht und natürlich mit Borkenkäfern befallenen Stammholz unter Berücksichtigung der vorgegebenen temperaturabhängigen Dosierung von:  $104 \text{ g SO}_2\text{F}_2/\text{m}^3$ , T:  $5^\circ\text{C}$  bis  $10^\circ\text{C}$ , bzw.  $80 \text{ g SO}_2\text{F}_2/\text{m}^3$ , T: über  $10^\circ\text{C}$ , Behandlungsdauer jeweils min. 24 h, ermittelt. Zur Bestimmung der Mortalität wurden die Stammstücke nach der Behandlung in Bodenphotoelektoren (BPE) überführt, ausschlüpfende Organismen quantifiziert und identifiziert (Abb. 1).

**Containerversuche mit  $\text{SO}_2\text{F}_2$  und  $\text{PH}_3$ :** Rundholzbegasungen wurden auf zugelassenen Begasungsplätzen für professionelle und angemeldete Begasungen unter Realpraxisbedingungen im Hamburger Hafen zur Ermittlung der Wirksamkeit von  $\text{SO}_2\text{F}_2$  und  $\text{PH}_3$  unter der Berücksichtigung der Einflussfaktoren: Temperatur, Dichtigkeit, Aufwandmenge, Gasverteilung, Wetter- und Windbedingungen durchgeführt. Hierfür wurden definierte

#### HIGHLIGHTS

- Handlungsanweisung des BMLEH für Export nach China erarbeitet
- Empfehlung von  $T \geq 10^\circ\text{C}$  für Begasung reduziert  $\text{SO}_2\text{F}_2$ -Emissionen um 20 % pro Behandlung und Pilottest mit TU-HH legt Basis für Abluftfilterung
- Heißdampf-Behandlung im Container kann eine wirtschaftliche und ökologische Alternative sein
- Wissenstransfers und Politikberatung vermittelten Ergebnisse zu aktuellen Fragestellungen zeitnah

Mengen an befallenen berindetem Stammholz in  $\text{SO}_2\text{F}_2$  und  $\text{PH}_3$ -Container-Behandlungen integriert und vorherrschende Bedingungen protokolliert. Nach der Behandlung wurden die behandelten Stammstücke sowie Kontrollstücke in BPEs überführt, ausschlüpfende Organismen quantifiziert und identifiziert.

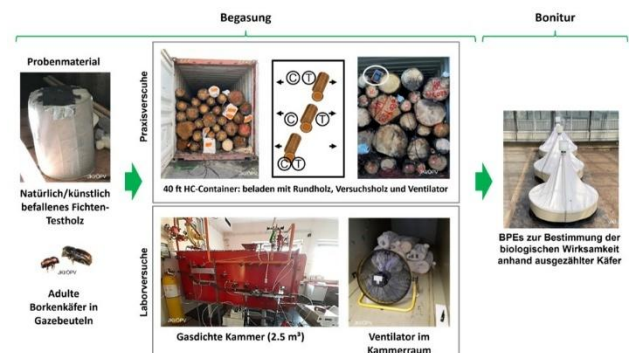


Abbildung 1: Design und Methode der Untersuchungen

**Wasserlagerung:** Die Behandlung erfolgte in Edelstahlwannen, in denen die Prüfkörper unter Wasser fixiert wurden. Die Lagerdauer betrug 15, 30, 45, 60, 75 und 90 Tage. Nach der Lagerung erfolgte die Bonitur in Ausflubboxen (serienabhängig  $\geq 12$ –24 Wochen). Die Wirksamkeit wurde als Verhältnis behandelte/Referenz bzw. als direkte Mortalitätsrate bestimmt. Zusätzlich wurden Feuchteprofile aus Stammscheiben (unversiegeltes/versiegeltes Ende, Mitte) bestimmt, um die Eindringtiefe des Wassers zu bestimmen.

**Modifizierte Atmosphären:** Mit Borkenkäfer befallene Holzproben wurden in Stickstoff- respektive Kohlendioxidatmosphäre gelagert und untersucht welche Expositionszeiten nötig sind, um die Organismen abzutöten. Es wurden Versuche mit diesen beiden Inertgasen durchgeführt, bei denen der Einfluss der Temperatur der Atmosphäre auf die Wirksamkeit bei verschiedenen Insektenlaven untersucht wurde. Die Versuche wurden sowohl in der vorhandenen Tränkanlage als auch im kleineren Labormaßstab durchgeführt.

## KLIMAWIRKUNG

Der Rundholzexport nach China lag 2024 bei 1,5 Mio. fm (Festmeter). Die vorschriftsmäßige Begasung der zum Transport notwendigen Container erfordert 167 t  $\text{SO}_2\text{F}_2$ , was einer Emission von jährlich 681.000 t  $\text{CO}_2\text{e}$  entspricht. Die Umsetzung der erarbeiteten Handlungsanweisung zum Einsatz von  $\text{SO}_2\text{F}_2$ , würde zu einer Einsparung von 20 %  $\text{SO}_2\text{F}_2$  und somit einer Reduktion um 136.000 t  $\text{CO}_2\text{e}$  führen. Bei einer 94 %-igen Reduktion durch die im Projekt aufgezeigten alternativen Behandlung mit Dampf kann eine Einsparung von ca. 640.000 t  $\text{CO}_2\text{e}$  realisiert werden.

**Wärmebehandlungen:** Wärmebehandlungen erfolgten sowohl mit trockener Hitze als auch mit Dampf. Die Versuche mit trockener Hitze wurden im Labor in Wärmeschränken und zusammen mit Dampfbehandlungen in einer Vakuum-/Dampf-Technikumsanlage geprüft: (1) trockene Heißluft (90 °C), (2) Vakuum/Dampf mit einer Vakuumphase und (3) Sattdampf. Zielkriterium: Kerntemperatur  $\geq 56$  °C für  $\geq 30$  min in Anlehnung an den internationalen IPPC-Standard zur Behandlung von Holzverpackungsmaterial für den internationalen Handel (ISPM 15). Gegen Ende des Projekts wurden noch Bedampfungen von Fichtenstämmen in einem 20'-Container durchgeführt, um eine Abschätzung für die Praxistauglichkeit und den Energieverbrauch dieser Methode zu erhalten.

**Mikrobiom-Analysen:** Mikrobiom-Analysen wurden mit Hilfe von Next-Generation-Sequencing durchgeführt, um die Auswirkungen von Wärmebehandlungen und Wasserlagerung auf das Mikrobiom, das sich in oberflächennahen Schichten der Hölzer befindet zu untersuchen. Um zu überprüfen, ob im Holz vorhandene Pilze nach den Behandlungen noch aktiv sind, wurde Bohrmehl aus den Stämmen für Wuchsversuche verwendet und entstandene Pilzkulturen mittels Sanger-Sequenzierung identifiziert.

**Treibhausgasbilanzierung und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung:** Abschließend wurden die als relevant identifizierte alternative Behandlungsmethode der Bedampfung in Bezug auf ihre Treibhausgasbilanz mit der  $\text{SO}_2\text{F}_2$ -Behandlung verglichen und Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit durchgeführt.

## ERGEBNISSE

### QPS-Behandlungen von Stammholz:

Sowohl in den Kammerversuchen als auch bei den Container-Behandlungen zeigte sich, dass die Temperatur die Verteilung von  $\text{SO}_2\text{F}_2$  an der Zielfläche maßgeblich beeinflusst. Insbesondere im oberen Bereich des Containers wird dies bei kalten Temperaturen deutlich. So blieb die  $\text{SO}_2\text{F}_2$ -Konzentration dort z. B. mit unter 50 g/m<sup>3</sup> anstatt der geforderten 104 g/m<sup>3</sup>. Durch Einsatz eines Ventilators zur Umwälzung der Containerinnenluft konnte bereits nach etwa 1,5 h ein Gleichgewicht in allen Höhen des Containers erreicht werden. Bei Temperaturen  $>14$  °C mit einer geforderten Dosierung von 80 g  $\text{SO}_2\text{F}_2$ /m<sup>3</sup> wird eine gleichverteilte Konzentration des Gases bereits innerhalb weniger Minuten erreicht und lag zwischen 120 und 170 g  $\text{SO}_2\text{F}_2$ /m<sup>3</sup> im freien Luftraum des beladenen und verschlossenen Containers (Abb. 2). Die technischen

Verbesserungen des Verfahrens, die auch die biologische Wirksamkeit positiv beeinflussen und so der Verbreitung von Schadorganismen durch Handel vorbeugen, sind in Kümritz und Kroos (2025) zusammengefasst.

Containerbegasung mit Profume – Einfluss der Temperatur auf die Verteilung von  $\text{SO}_2\text{F}_2$

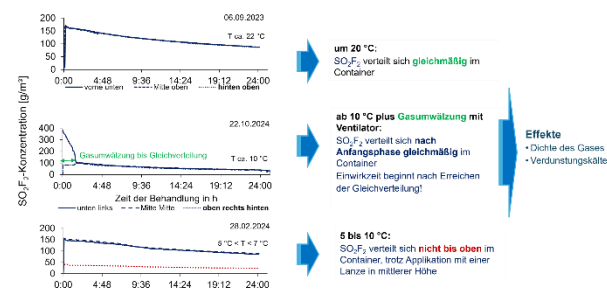


Abbildung 2: Einfluss der Temperatur auf die  $\text{SO}_2\text{F}_2$ -Verteilung

Neben der Temperatur an der Zielfläche des Holzes und der Gleichverteilung des Gases im Innenraum sind die Expositionszeit, gemessen ab dem Equilibrium, die Gaskonzentration des Containers, Wetter- und Windbedingungen, die Entwicklungsstadien der Schadinsekten, die Holzart und -beschaffenheit sowie insgesamt der Qualitätsstandard der Behandlung ausschlaggebend für die Wirksamkeit und somit Voraussetzung für eine erfolgreiche Tilgung vorhandener (Quarantäne)-Schadinsekten. Die Bonitur der Stammstücke ergab, dass eine Behandlung der Stammstücke bei 5-10 °C die rindenbrütenden Käfer in allen Entwicklungsstadien nur unzureichend abtötete. Zusätzlich wirken sich die saisonale Aktivität der Insektenarten und unterschiedliche Toleranz der Stadien auf die Wirksamkeit aus, da die Toxizität von  $\text{SO}_2\text{F}_2$  von der Atmungs-/Stoffwechselaktivität der Zielorganismen und der Diffusion durch die Eihülle abhängt. Die Ergebnisse des Projekts verdeutlichen, dass:

- eine Handlungsanweisung, die sich an internationalen Standards und am Stand von Wissenschaft und Technik orientiert - zielführend ist
- die Temperatur an der Zielfläche entscheidend ist
- die Behandlung vorausschauend im Kontext mit den Wetterprognosen geplant werden muss
- Temperatur- und Gaskonzentrationsverläufe während der Behandlung zu dokumentieren sind
- ein Drucktest auf Gaskonzentration bei den Standardseecontainern zu empfehlen ist bzw. die Half-Loss-Time (HLT) festgesetzt werden sollte
- die Kontrolle der Länderbehörden vor Ausstellung der Pflanzengesundheitszeugnisse intensiviert werden muss

**EDN-Literaturrecherche:** Ethandinitril ( $\text{C}_2\text{N}_2$ ) ist kein klimaschädigendes Gas und gilt mit seinen  $\text{CN}^-$  Ionen als wirksam gegen Insekten, wie Phosphan auch gegen Eistadien, letzteres aber benötigt kürzere Einwirkzeiten. Wie Phosphan absorbiert es an Holz, was bei der Lüftung und Abluftfilterung sowie dem Umgang mit behandeltem Holz berücksichtigt werden muss (Tab. 1). Es gibt aktuell weder eine Wirkstoffgenehmigung in der EU noch eine Zulassung als Pflanzenschutzmittel in Deutschland, aber zwischenzeitlich Zulassungen des Mittels in Australien, Südkorea und Neuseeland. In letzterem ist die Verwendung von EDN zur Begasung von Rundholz für den Export nach China vorgesehen.  $\text{C}_2\text{N}_2$ -haltige Mittel können die phytosanitäre Toolbox aufgrund der guten Durchdringung von Holz (auch



bei hohem Feuchtegehalt) und der Wirksamkeit bei niedrigeren Temperaturen erweitern.

**Wissenstransfer:** Drei Wissenstransfer-Veranstaltungen vermittelten die Ergebnisse des Projektes zeitnah, förderten die Kommunikation zwischen Stakeholdern, mit dem UBA (TA-Luft, F-Gas-VO) und der Politik auf Bundes- und Länderebene (z. B. Handlungsanweisung).

Tabelle 1: Begasungsmittel im Rundholz

Parameter	SO <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	PH <sub>3</sub>	C <sub>2</sub> N <sub>2</sub>
Formulierung des PSM	Gas in Druckflasche	ausgasender Feststoff	Gas in Druckflasche
Eigenschaften	Treibhausgas; kurze Einwirkzeit (EWZ), reaktionsträge	kein Treibhausgas; längere EWZ; korrosiv; selbstentzündlich; Gas-Luft-Gemisch explosionsfähig	kein Treibhausgas; kurze EWZ; korrosiv; brennbar; Gas-Luft-Gemisch explosionsfähig
Gasverteilung im Container bei niedrigen Temperaturen	etwa 3,47x schwerer als Luft; ungleichmäßig	etwa wie Luft (1,18x); gleichmäßig, aber absorbiert an Holz	etwa 1,8x schwerer als Luft; Konz. im Luftraum nimmt rasch ab; adsorbiert im Holz
Biologische Wirksamkeit gegen Eistadien	Wirkungslücke bei Eiern -> nicht tilgend unter 17 °C und 80g/m <sup>3</sup> (24h)	ja, 3-5g PH <sub>3</sub> /m <sup>3</sup> (72h)	ja, 120g/m <sup>3</sup> (≤ 24h)
Wirkstoffgenehmigung in EU (10/2025)	bis 31.01.2027	bis 30.11.2026	/
Zulassungssituation	u. A. NL, BE; DE	FR, LT, ES, CZ	AU, KR, MY, NZ
Anerkennung CN für Einfuhr aus DE	ja	nein, aber z.B. bilateral CN-NZ	nein, aber z.B. bilateral CN-NZ
Maßnahmen zur Emissions-minderung	Abgasreinigungseinrichtung erforderlich, aber industriell noch nicht umsetzbar	Abgasreinigungseinrichtung erforderlich und etabliert	Abgasreinigungseinrichtung erforderlich

**Wasserlagerung:** Durch die Unterwasserlagerung von infizierten Fichtenstämmen konnte gezeigt werden, dass bereits nach 15 Tagen 95 % der Insekten im Prüfkörper abgetötet waren; nach 30 - 90 Tagen waren 98 - 99 % tot. Die Unterwasserlagerung von Eiche ergab 68 % Mortalität nach 15 Tagen und zwischen 96 - 100 % nach 30 - 90 Tagen. Für den Prozess des Eindringens des Wassers in den Stamm konnte gezeigt werden, dass dies nicht maßgeblich über den Querschnitt erfolgt, sondern in erster Linie durch die Fraßgänge der Käfer. Die Unterwasserlagerung von Fichte ist eine Herausforderung, da die Stämme schwimmen und daher unter Wasser gedrückt und fixiert werden müssen.

**Modifizierte Atmosphären:** Es wurden Versuche zur Lagerung von mit Borkenkäfern infiziertem Fichtenholz mit Stickstoff sowie mit Kohlendioxid durchgeführt. Hierbei hat sich herausgestellt, dass bei einer Lagerung für 28 Tage eine deutliche Reduktion der Käferzahl erfolgte, jedoch keine vollständige Abtötung erreicht wurde. Versuche mit verschiedenen Insektenlarven haben jedoch gezeigt, dass die Mortalität sehr schnell ansteigt, wenn man die Temperatur in den Inertgasatmosphären erhöht. So bewirkt eine Erhöhung auf 35 °C in den meisten Fällen bereits eine 100% ige Mortalität nach einem Tag (Abb. 3). Für die Anwendung im Containermaßstab scheint die Methode derzeit allerdings nur bedingt geeignet, da Container üblicherweise nicht komplett gasdicht sind und die Verdrängung des Sauerstoffs aus den Containern große Mengen an Inertgas voraussetzen würde.

**Wärmebehandlungen:** Wärmebehandlungen mit trockener Hitze führten zur zuverlässigen Abtötung der Schadorganismen, wenn mindestens 56 °C Kerntemperatur für 30 Minuten erreicht wurden. Gleichzeitig kommt es zu einem Qualitätsverlust des Holzes durch Austrocknung und Rissbildung. Bei Behandlungen mit Dampf traten diese Probleme jedoch nicht auf. Die drei Prozesse, die in der Vakuumdampfanlage untersucht wurden erreichten die Kerntemperatur ≥56 °C für ≥30 min (Tab. 2).

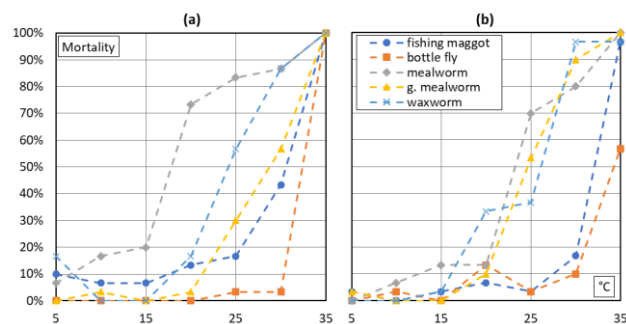


Abbildung 3: Mortalität nach einem Tag in (a) CO<sub>2</sub>-Atmosphäre und (b) N<sub>2</sub>-Atmosphäre in Abhängigkeit der Temperatur.

Tabelle 2: Wärmebehandlungen in einer Vakuumanlage: Prozessdauer, Aufheizzeit und Energiebedarf bei 126 kg Beladung

Prozess	Prozess-dauer (h)	Aufheizzeit 15→56 °C	Energieverbrauch (Wh/kg)
Trockene Heißluft	10,9	5,1	325
Vakuum/Dampf	5,6	3,1	252
Sattdampf	7,7	2,7	286

Das Anlegen eines technisch aufwendigen Vakuums bietet kaum Vorteile und der Energieverbrauch war in allen Varianten maßstabsbedingt noch sehr hoch. Bei einer Behandlung von Fichtenstämmen mit Dampf im Containermaßstab konnte jedoch gezeigt werden, dass die Energieeffizienz deutlich gesteigert werden kann. Der theoretisch notwendige Energieaufwand um frisches Fichtenholz (ca. 18 t) in einem 20'-Container bis auf 56 °C zu erhitzen, die anschließend für 30 Minuten gehalten werden, beträgt ca. 650 kWh (35 Wh/kg). Geht man von einem realen Wirkungsgrad der Dampfbehandlung von 50 % aus, so ergeben sich etwa 1300 kWh Energieverbrauch für einen 20'-Container oder etwa 2600 kWh für einen doppelt so großen 40'-Container. Durch gute Isolation der Container, die aus Stahlblech bestehen und im Laufe des Bedampfungsprozesses sehr viel Wärme abgeben, lässt sich der Wirkungsgrad noch deutlich verbessern und somit der Energieverbrauch senken.

**Mikrobiom-Analysen:** Im Fall der Wärmebehandlung gab es große Überschneidungen bei Pilzen, die vor und nach der Behandlung in einer Holzprobe gefunden wurden. Die drei dominantesten Arten waren *Helicodendron websteri*, *Amylostereum aureolatum* und *Trichoderma atroviride*. Die Wärmebehandlung hatte dabei keinen signifikanten Einfluss auf die Anzahl der nachgewiesenen Sequenzvarianten und auf die Arten-Zusammensetzung („Beta-Diversität“) (Abb. 4). Zu den Pilzarten, die nach der Behandlung wuchsen, gehörten u. a. *Endoconidiophora polonica*, *Penicillium* sp., *Sarea resinae* und *Sydowia polyspora*.

Auch bei der Wasserlagerung ähnelten sich die erkannten Arten je Probe (z. B. *A. aureolatum*). Anders als bei der Wärmebehandlung gab es signifikante Unterschiede bei der Anzahl gefundener Sequenzvarianten, diese nahmen nach der Wasserlagerung deutlich ab, was möglicherweise auf eine Abwaschung der Pilzsporen während der Wasserlagerung zurückzuführen ist. Zusätzliche Wuchsversuche zeigten, dass Wärmebehandlung und Wasserlagerung Pilze nicht vollständig abtöten konnten.

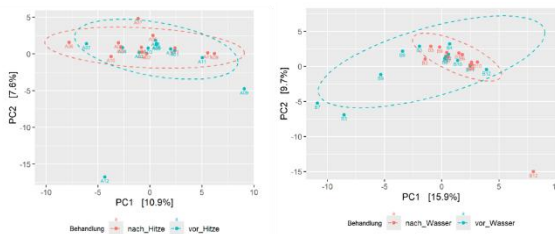


Abbildung 4: Hauptkomponentenanalyse zum Vergleich der Artenzusammensetzung jeder Probe vor (blau) und nach (rot), links) Wärmebehandlung, rechts) 90-tägiger Wasserlagerung.

### Treibhausgasbilanzierung und Wirtschaftlichkeit

#### CO<sub>2</sub>-Äquivalente als Bezugsgröße zur Bilanzierung:

Als Referenzwert für die Treibhausgasbilanz wird die SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>-Behandlung im Seecontainer berechnet. Grundlage sind Container-Innenvolumen (V) und eine Dosierung von  $c \geq 80 \text{ g SO}_2\text{F}_2/\text{m}^3$  für  $T \geq 10^\circ\text{C}$ . Die SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>-Aufwandmenge ergibt sich aus  $m = c \times V$  und liegt für einen 40'-Container (67,7 m<sup>3</sup>) bei 5,4 kg SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>. Diese Menge SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> multipliziert mit einem GWP<sub>100</sub> (Treibhauspotenzial über einen Zeitraum von 100 Jahren) von 4.090 ergibt 22,15 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente (CO<sub>2</sub>e). In Tabelle 3 ist die CO<sub>2</sub>-Bilanz einer SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>-Begasung im Vergleich zur bereits wirksamen Dampfbehandlung bis 56 °C und für die in den Einfuhrbestimmungen verlangten 71,1 °C dargestellt.

Tabelle 3: CO<sub>2</sub> Äquivalente (CO<sub>2</sub>e) von SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>-Begasung und Dampfbehandlung im 40' Container; berechnet mit GWP<sub>100</sub> = 4.090 für SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> und 363 g CO<sub>2</sub>/kWh für den Strom zur Dampferzeugung (deutscher Strommix 2024)

Zieltemperatur	SO <sub>2</sub> F <sub>2</sub> -Aufwand (kg)	CO <sub>2</sub> e (t) SO <sub>2</sub> F <sub>2</sub> -Begasung	Energieverbr. Dampfb. (kWh) rechnerisch	CO <sub>2</sub> e (t) Dampfb. rechnerisch	Energieverbr. Dampfb. (kWh) 50% Wirkungsgrad	CO <sub>2</sub> e (t) Dampfb. 50% Wirkungsgrad
56°C	5,4	<b>22,15</b>	1300	0,472	2600	<b>0,944</b>
71°C	5,4	<b>22,15</b>	1770	0,643	3540	<b>1,285</b>

Für die Dampfbehandlungen ergeben sich ca. 1 t (bei 56 °C) beziehungsweise 1,3 t (bei 71,1 °C), für die SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>-Behandlung hingegen 22 t CO<sub>2</sub>e. Würde die SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>-Behandlung von Rundholz für den Export durch eine Dampfbehandlung ersetzt werden, würde sich der CO<sub>2</sub>-Ausstoß bei einer Zieltemperatur von 56 °C um 95 % reduzieren, bei einer Zieltemperatur von 71 °C um ca. 94 %. Die CO<sub>2</sub> Bilanz der Wasserlagerung ist am niedrigsten, da hier kaum Energie verbraucht wird und die der alternativen Inertgas-Behandlungen sind ebenfalls gering. Lediglich durch die

Herstellung einer CO<sub>2</sub>-Atmosphäre selbst würde erwähnenswert CO<sub>2</sub> emittiert. Bei einem Gewicht von knapp 2 kg/m<sup>3</sup> und einer 2-fachen Einleitung des Volumens eines leeren 40' Containers (67,7 m<sup>3</sup>) um alle Luft zu verdrängen, läge der CO<sub>2</sub>-Verbrauch im Bereich von 135 kg pro Container.

**Wirtschaftlichkeitsbetrachtung:** Für die Alternativen Behandlungsmethoden wie Inertgas-Behandlung und Wasserlagerung ist es schwierig die Kosten zu kalkulieren, da sie aktuell nicht praktiziert werden und die Logistik hierfür nicht bekannt ist.

Die SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>-Begasung eines 40'-Containers kostet in Hamburg gegenwärtig ca. 200 €, zuzüglich durchschnittlich etwa 25 € für notwendige Aufheizungen im Winter.

Die Bedampfung eines 40'-Containers mit Fichtenholz würde bei einem Industriestrompreis von 0,20 €/kWh und einem Verbrauch von 2600 kWh 520 € (bei 56 °C) bzw. 708 € (bei 71 °C) kosten. Hinzu kommen die Anschaffungskosten für Dampferzeuger und die Kosten für eine mobile Wärmeisolation der Container. Setzt man hierfür pauschal 10.000 € an und eine Standzeit von 500 Bedampfungen, dann würden 20 € pro Bedampfung hinzukommen. In Summe also etwa 540 € (bei 56 °C) bzw. 728 € (bei 71 °C) pro Bedampfung. Insgesamt würde sich somit der Preis für exportiertes Fichtenholz trotz der höheren Behandlungskosten nur geringfügig erhöhen.

### SCHLUSSFOLGERUNGEN

Der Export von Rundholz in Drittländer verlangt in der Regel die Anwendung phytosanitärer Maßnahmen, welche die Verschleppung von Schadorganismen in andere Teile der Welt verhindern soll. Gegenwärtig wird ein Großteil der Ware mit SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> behandelt, jedoch stehen alternative Behandlungsmöglichkeiten theoretisch zur Verfügung. Für die Rundholzbehandlung zur Verschiffung im Seecontainer ergeben sich folgende Maßnahmen und Empfehlungen:

#### AUSGEWÄHLTE VERÖFFENTLICHUNGEN

- Kümmritz, S et al. (2023): Dt. Pflanzenschutztagung
- Benthien, JT et al. (2024): 32. Dt. Holzschutztagung
- Weber, G et al. (2024): IRG WP55
- Kümmritz, S & Kroos, GM (2025): IRG WP56

### HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN FÜR POLITIK UND PRAXIS

- Einheitliche Behandlungsstandards und gute fachliche Praxis etablieren, national und international
- Emissionen durch geringere Aufwandsmengen, Abluftfilterungen oder andere Abscheideprozesse reduzieren
- Erweiterung der Toolbox für Begasungen um nicht klimarelevante, aber wirksame Methoden wie PH<sub>3</sub> und C<sub>2</sub>N<sub>2</sub> und einer Kombination von Substanzen, die auch Eistadien verlässlich tilgen, mit Hitze und/oder Entrindung
- Dampfbehandlung von Rundholz unter den geforderten 71,1 °C (alternativ 56 °C für 30 min analog zum ISPM15) als alternative Methode propagieren und gegenüber Importländern durchsetzen.
- Forschung optimalen technischen Umsetzung der Bedampfungsmethode und zur Auswirkung dieser Behandlung auf die Holzqualität
- Forschung zu alternativen phytosanitären Methoden, sowie der Kombination verschiedener Verfahren (system approach)

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

### Kohlenstoffsequestrierung und Wasserhaushalt von Stadtbäumen

Mona Quambusch, Vera Hörmann, Falko Feldmann, Michael Strohbach, Malkin Gerchow, Johannes Hoppenbrock, Arsené Rutikanga, Burkhard Golla, Jörn Strassemeyer, Anto Raja Dominic, Sebastian Preidl, Nilraj Shrestha, Kirsten Strauss und Suchana Dahal (Julius Kühn-Institut); Matthias Beyer und Michael Strohbach (TU Braunschweig); Matthias Bücker (CAU Kiel)

#### ZIELSETZUNG

Bäume prägen unser Stadtbild, beeinflussen das Mikroklima und speichern Kohlenstoff in ihrer Biomasse. Ziel des CliMax-Projektes war es Wasserstress frühzeitig und effektiv zu erkennen und die Folgen von Stress auf die Baumgesundheit zu monitoren. Auf dieser Basis sollen Empfehlungen für ein angepasstes und vorausschauendes Baummanagement entwickelt werden, um die langfristige Kohlenstoffspeicherung urbaner Bäume zu erhalten und zu maximieren.

#### METHODIK

Für das Projekt wurden drei Themenblöcke identifiziert: der Wasserhaushalt, das Stress- und Gesundheitsmonitoring und die Abschätzung der Kohlenstoffsequestrierung von Stadtbäumen. Die eingesetzten Forschungsmethoden zeichnen sich durch unterschiedliche zeitliche und räumliche Auflösungen aus. So wurden neun ausgewählte Testflächen in Braunschweig intensiv vor Ort untersucht. Parallel dazu erfolgte eine umfassende Auswertung von städtischen Baumkatasterdaten sowie von LiDAR- und Satellitendaten aus Braunschweig und Brandenburg an der Havel.

Die Braunschweiger Testflächen umfassten 45 Bäume (15 Winterlinden, 15 Säuleneichen und 15 Baumhaseln) in unterschiedlichen städtischen Umgebungen, die sich in der Beschaffenheit der Baumumgebung unterscheiden (unversiegelte, teil- und vollversiegelte Flächen; Abb. 1).



Abbildung 1: Kategorisierung der erforschten Baumstandorte.

© V. Hörmann, JKI

#### Wasserhaushalt

Wasser ist einer der häufigsten limitierenden Faktoren für das Pflanzenwachstum. Daher wurde im CliMax-Projekt der Baumwasserhaushalt erforscht. An neun Standorten wurden Bodenfeuchtesensoren (TDT-Prinzip, SMT 100 Trübner) in vier Tiefen (15 cm, 30 cm, 50 cm, 200 cm) und ein Bodenfeuchtesensor (WETG150 Delta-T) in 100 cm installiert. Je drei der Bäume wurden mit Saftflusssensoren (SFM-5, Edaphic) ausgestattet, die den Wasserverbrauch der Bäume messen. Mit einem IoT Datenlogger (Solidustech) wurden die Daten mit einer Auflösung von 60 Minuten aufgezeichnet und in ein Dashboard (Grafana) integriert.

Um die Wasseraufnahmetiefen der Bäume zu untersuchen, wurden auf stabilen Wasserisotopen basierende Messungen (Picarro L2130i) durchgeführt. 2024 fand ein Wasserisotopen-Markierungsversuch statt, bei dem in zwei Tiefen (50 cm und

#### HIGHLIGHTS

- Bäume zeigen ein deutlich geringeres Wachstum in kleineren Pflanzgruben. Ein Grund dafür ist die Wasserverfügbarkeit. Bei starker Versiegelung zeigte sich, dass nur ein begrenztes Wasserreservoir im Boden zur Verfügung steht.
- Ein Baum nimmt täglich im Durchschnitt zwischen 15 und 60 Liter Wasser auf.
- Bäume stellen einen wichtigen Kohlenstoffspeicher in Städten dar. Eine 50-jährige Baumhasel hat ca. 1000 kg CO<sub>2</sub> in ihrer Biomasse gespeichert.

100 cm) mit Deuterium angereichertes Wasser appliziert wurde und die Aufnahme des Tracers durch die Bäume untersucht wurde. Zudem wurde die Wassernutzungseffizienz der Bäume (13C) einmalig bestimmt. Mit diesen Methoden konnten die Wasserverfügbarkeit im Boden, die Wassernutzung, die Wassernutzungseffizienz und die Wasseraufnahmetiefen der Bäume quantifiziert werden.

Bodenfeuchtesensoren liefern kontinuierliche, aber punktuelle Informationen. Um jedoch einen umfassenderen Einblick in den Untergrund zu gewinnen, kamen räumlich hochaufgelöste geophysikalische Methoden zum Einsatz. Diese erfassen non-invasiv und von der Oberfläche aus die elektrische Leitfähigkeit des Bodens, die wiederum Rückschlüsse auf den Wassergehalt zulässt. So konnte mithilfe geoelektrischer Monitoringmessungen die jahreszeitliche Variation der Bodenfeuchte räumlich hoch aufgelöst erfasst werden.

#### Stress- und Gesundheitsmonitoring

Bäume in Städten wachsen häufig an extremen Standorten, die geprägt sind durch einen anthropogenen, verdichteten Boden, Straßen und Gebäude, die sich stark aufheizen sowie Verkehrsabgase. All dies kann Stress in Pflanzen auslösen. Da Trockenstress jedoch einer der zentralen Faktoren ist, wurde der Fokus auf die Detektion von Wasserstress gelegt.

Es gibt verschiedene Methoden, um Stress bei Pflanzen zu erfassen; dazu wurde ein Review-Artikel geschrieben (Hörmann et al., 2025). Zu den Methoden zählen u. a. die Messung des Wasserpotenzials, des relativen Blattwassergehalts sowie der Chlorophyllfluoreszenz. An den Braunschweiger Testbäumen wurden monatlich der relative Blattwassergehalt und die Chlorophyllfluoreszenz (Pocket Pea oder Arborcheck, Hansatech) ermittelt, das Wasserpotenzial wurde zu drei Zeitpunkten in den Jahren 2024 und 2025 gemessen.

Mit diesen Methoden lässt sich akuter Wasserstress ermitteln. Darüber hinaus wollten wir auch die langfristigen Auswirkungen der Standortbedingungen auf die Baumgesundheit verstehen. Deshalb haben wir den Gesundheitszustand der Bäume anhand der Kronenstruktur visuell bewertet.

Zur stadtweiten Evaluierung der Vitalität von Stadtbäumen wurden Fernerkundungsmethoden genutzt. Hierfür müssen zunächst die einzelnen Bäume auf Luftbildern erkannt werden. Dazu wurden die Stadtbäume automatisch aus LiDAR-



## KLIMAWIRKUNG

Die Lebenszyklusanalyse der drei Arten – Winterlinde, Säuleneiche und Baumhasel – zeigte, dass die CO<sub>2</sub>-Neutralität im Mittel zwischen dem 12. und 15. Standjahr erreicht wird. Das bedeutet, dass Bäume mindestens 12 Jahre an Ihrem Standort stehen müssen, damit eine längerfristige Kohlenstoffbindung erreicht werden kann. Da Neupflanzungen beim derzeitigen Stand der Technik mit Emissionen verbunden sind, werden Baumstandorte mit regelmäßigen Nachpflanzungen zu einer Treibhausgasquelle. Alte Bäume speichern nicht nur viel Kohlenstoff, sie sorgen auch für mehr Verschattung und Verdunstungskühlung. Ein optimaler Baumstandort ist daher ausschlaggebend für eine positive Klimawirkung von Stadtbäumen.

Punktwolken für Braunschweig und Brandenburg an der Havel detektiert. Gebäude, Straßen und andere menschengemachte Objekte wurden durch einen Machine-Learning-Schritt identifiziert und entfernt, die Differenzierung der einzelnen Bäume erfolgte mittels markerbasierter Watershed-Segmentierung. Anschließend konnten Kronenfläche, Kronendurchmesser und Baumhöhe für jeden Baum bestimmt werden.

Sentinel-2-Bilder (von 2018 bis 2024) wurden für die Vitalitätsbeobachtungen eingesetzt. Viele der Sentinel-2-Pixel mit 10 m Auflösung über Städten bestehen aus gemischten Signalen von Bäumen, Gras und Infrastruktur (Gebäude und Straßen). Um diese Signale zu trennen wurden synthetische Trainingsdatensätze erstellt und „reine“ Baumsignale extrahiert. Anschließend wurde der Enhanced Vegetation Index (EVI) aus den Farbkanälen berechnet. Ein Referenz-EVI gesunder Bäume wurde mit den beobachteten Werten verglichen; wenn der EVI eines Baumes unter den Schwellenwert fiel, wurde ein Baum als „auffällig“ eingestuft.

Die Kombination der Fernerkundungs-, Baumkataster- und Umweltdaten wurde angestrebt, um einen dynamischen Vitalitätsindex für Stadtbäume entwickelt. Jedoch zeigte sich, dass die verfügbaren Daten lückenhaft waren und keine geeignete Datengrundlage darstellen, um umfassende Rückschlüsse auf Veränderungen der Vitalität zu ziehen. Daher wurde das Wachstum als ein indirekter Vitalitäts-Indikator gewählt. Die Wachstumsgeschwindigkeit wurde anhand der Baumkatasterdaten ermittelt, indem die Veränderung des Brusthöhendurchmessers (BHD) in Relation zum Alter der Bäume gesetzt wurde. Die baumspezifische kumulative Globalstrahlung – sowohl direkt als auch diffus – wurde auf Basis von 3D-Gebäudemodellen, LiDAR-Daten der Bäume und digitalen Geländemodellen (DGM) mithilfe der Tools Ladybug und Grasshopper für die Wachstumsperiode vom April bis Oktober berechnet. Ziel war es, den Zusammenhang zwischen kumulativer Globalstrahlung (kWh) und Baumwachstum (cm/Jahr) artspezifisch zu analysieren und mögliche Auswirkungen der Strahlung auf die Vitalität städtischer Bäume zu identifizieren.

## Kohlenstoffsequestrierung von Stadtbäumen

Bäume speichern Kohlenstoff in ihrer Biomasse. Um den gespeicherten Kohlenstoff abschätzen zu können gibt es verschiedene Wege. Häufig werden allometrische Gleichungen verwendet. Sie stellen einen Zusammenhang zwischen leicht messbaren Merkmalen wie dem BHD und schwerer zu erfassenden biologischen Größen wie der Holzbiomasse her.

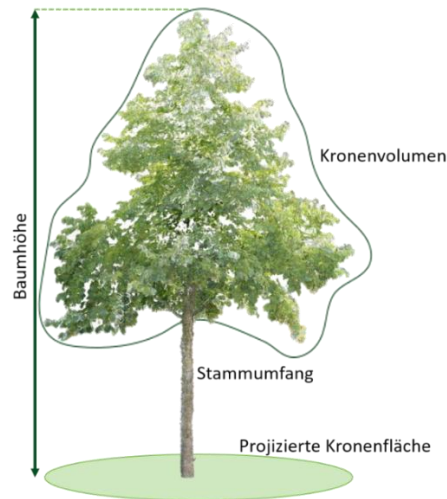


Abbildung 2: Erfasste Baummaße.  
© M. Strohbach & V. Hörmann, JKI

Für Stadtbäume gab es bisher nur wenige allometrische Formeln. Im Projekt wurden auf der Basis terrestrischer Laserscans (RIEGL VZ-400i) von 147 Bäumen und 9 Arten bzw. Sorten allometrische Formeln entwickelt. Die Volumina der Bäume wurden mit Zylindermodellen geschätzt (MATLAB Bibliothek TreeQSM; Zweigkorrektur mit rTwig in R) und mit Holzdichten aus der Literatur (Zanne et. al, 2009) multipliziert. Neben klassischen allometrischen Formeln, die die Vorhersage der Biomasse auf Basis des BHD zulässt, wurden auch Formeln angepasst, die die Biomasse aus Kronenfläche und Baumhöhe vorhersagen können. Damit können Vorhersagen auf Stadtebene ohne den häufig fehlenden oder veralteten BHD getätigt werden.

Das Pflanzen und die Pflege von Bäumen erfordert zahlreiche Arbeitsgänge, die mit Treibhausgasemissionen verbunden sind. Um Sequestrierung von Kohlenstoff durch Wachstum der Bäume in ein Verhältnis zu Emissionen zu bringen und um Stellschrauben für eine Reduktion von Treibhausgasemissionen zu finden, haben wir eine Lebenszyklusanalyse durchgeführt. Dafür wurden Experteninterviews mit Mitarbeitenden der Stadtverwaltungen Braunschweig und Brandenburg an der Havel sowie zwei Baumschulen geführt und mit umfassenden Recherchen zu den Arbeitsvorgängen ergänzt.

## ERGEBNISSE

### Wasserhaushalt

Die Ergebnisse unserer Untersuchungen zeigen sehr deutliche Unterschiede zwischen den untersuchten Baumarten und Versiegelungsgraden. Weiterhin zeigte sich die immense Heterogenität von Stadtbaumstandorten. Beispielsweise zeigten die versiegelten und teilversiegelten Standorte große Unterschiede in der Wasserverfügbarkeit. Während in den relativ niederschlagsreichen Sommern 2023 und 2024 die Bodenfeuchte an nahezu allen Standorten ausreichte, um die Bäume zu versorgen, zeigte sich nach dem trockenen Frühjahr 2025 ein starkes Wasserdefizit in den obersten 2 m des Bodens. Einzig an den unversiegelten Standorten gab es noch pflanzenverfügbares Wasser in den oberen 2 m. Alle versiegelten Standorte zeigten Wassergehalte unterhalb der Pflanzenverfügbarkeit.

Hinsichtlich der Wassernutzung gab es klare Muster, sowohl auf Speziesebene als auch in Bezug auf den Versiegelungsgrad. Die Reihenfolge der Wassernutzer in den Sommermonaten (hoch zu niedrig) ist: Baumhasel 60 Liter/Tag > Winterlinde 25 Liter/Tag >



Pyramidenkieche 15 Liter/Tag; nach Versiegelungsgraden: unversiegelt = teilversiegelt > vollversiegelt.

Die Wasserpotenzialmessungen in 2024 und 2025 zeigten, dass Bäume an gering versiegelten Flächen weniger gestresst waren (höheres Wasserpotenzial) als an stark versiegelten Flächen (. Der Grad des Wasserstresses war jedoch nicht extrem. Im etwas trockeneren Sommer 2025 wiesen die Pyramidenkieche am versiegelten Standort vor dem Sonnenaufgang ein Wasserpotenzial von -0.44 MPa an den unversiegelten und von -0.52 MPa an den vollversiegelten Standorten auf.

Unsere Daten zu Wassernutzung und Wasserstress (Wasserpotenziale) legen die Vermutung nahe, dass die Bäume sich an den jeweiligen spezifischen Standort angepasst haben. Die Baumhasel beispielsweise wies in keinem der Jahre massiven Wasserstress auf; die Wassernutzung der Bäume unterschied sich aber substantiell zwischen den Standorten. Die Spezies reguliert demnach ihren Wasserhaushalt während Trockenphasen sehr effizient. Ähnliche Muster fanden sich bei der Winterlinde. Einzig die Pyramidenkieche zeigte starke Stresssymptome am versiegelten Standort. Dieser Standort scheint eine Grenze für die Anpassungsfähigkeit darzustellen. Die oben geschilderte Anpassung wird auch an der Wassernutzungseffizienz sichtbar: Wassernutzungseffizienz (Menge an verbrauchtem Wasser pro Menge an gebundenem CO<sub>2</sub>) ist am höchsten an den versiegelten Standorten – dort nutzen die Bäume die geringere verfügbare Wassermenge effizienter.

Bei den Untersuchungen zu den Wasseraufnahmetiefen zeigte sich, dass diese über das laterale Wurzelsystem der Bäume an den unversiegelten Standorten tiefer sind als an den versiegelten Standorten. An allen unversiegelten Standorten wurde eine Wasseraufnahme aus Tiefen bis zu 2 m beobachtet. An den teil- und vollversiegelten Standorten gab es nur bei der Winterlinde Indizien für eine Wasseraufnahme tiefer als 1 m unter Geländeoberkante. Versuche mit Wasserisotopen bei Baumhasel und Pyramidenkieche wurden keine Aufnahmetiefen unterhalb 50 cm identifiziert, dies kann jedoch auch bedeuten, dass das genutzte Wasserreservoir unterhalb der untersuchten Tiefe (Maximale Applikationstiefe 1 m) liegt.

Um die teils geringfügigen Änderungen in den spezifischen elektrischen Widerständen (<1 %) und damit in der Bodenfeuchte zu identifizieren, wurden die geoelektrischen Daten mit einer temperaturkorrigierten Time-Lapse Inversion ausgewertet. Auf diese Weise ließen sich aus den monatlich aufgezeichneten Geoelektrikdaten Bereiche unter den Bäumen identifizieren, die durch die Wasseraufnahme deutlich reduzierte Bodenfeuchten zeigten. An stark versiegelten Standorten mit kleinen Baumscheiben sind diese Bereiche räumlich stark eingeschränkt - offenbar durchdringen die Wurzeln im Untergrund nur ein stark begrenztes Volumen (das untere Bild in Abb. 3). An unversiegelten Standorten dagegen, an denen wir eine uneingeschränkte Durchwurzelung des Bodens vermuten, zeigen sich deutlich größere Einflussbereiche (oberes Bild in Abb. 3). Dies zeigt, dass die Bodenversiegelung bzw. der Verdichtungsgrad des Bodens direkt beeinflusst, wie groß das Bodenvolumen ist, aus dem ein Baum sich mit Wasser versorgen kann.

Zeitlich höher aufgelöste Messreihen von mehreren aufeinanderfolgenden Sommertagen zeigen: Die Bodenbereiche, aus denen die Bäume ihr Wasser aufnehmen, werden im Verlauf des Tages trockener und erholen sich in der Nacht bis zu einem gewissen Grad durch Umverteilungen wieder. Diese Beobachtung wird auch durch Bodenfeuchtedaten bestätigt.

Zur weiteren Charakterisierung der Standorte, einschließlich ihrer Untergrundstruktur (z. B. untertägige Infrastruktur, Bodenschichten), wurden komplementäre Messungen mit Georadar und seismischen Verfahren durchgeführt. Die

Oberflächen rund um die Baumstandorte wurden auf Basis eingefärbter Laserscans, mit denen Orthophotos generiert wurden, quantifiziert.

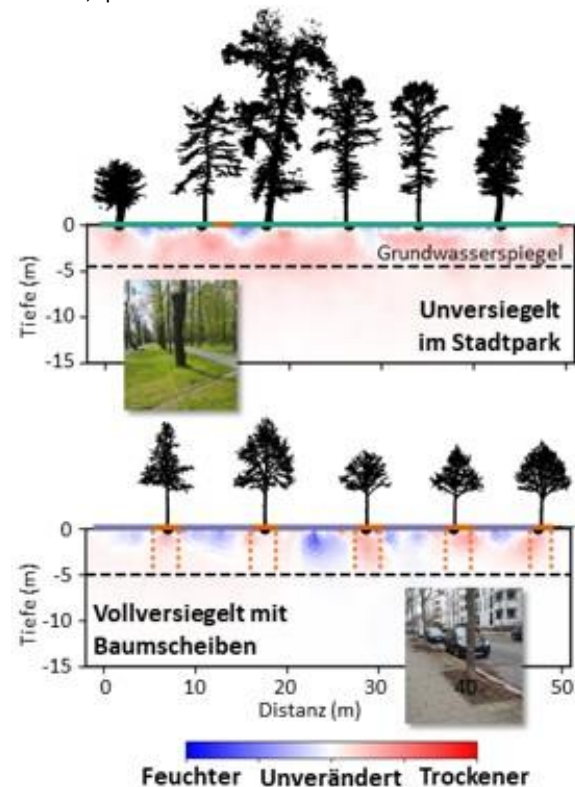


Abbildung 3: Veränderung der Bodenfeuchte im Sommer an einem unversiegelten und versiegelten Standort. Die Wasseraufnahme am versiegelten Standort ist außerhalb der Baumscheiben eingeschränkt. © J. Hoppenbrock, JKI

### Stress- und Gesundheitsmonitoring

Die zwei eingesetzten Chlorophyllfluoreszenz-Systeme zeigten ähnliche Muster im jahreszeitlichen Verlauf, der Arborcheck war jedoch, aufgrund der Ausgabe von bereits ausgewerteten Ergebnissen, eher für Citizen-Science Ansätze anwendbar während der Pocket Pea die vollständige Datenausgabe für weitreichende wissenschaftliche Analysen ermöglichte. Die Chlorophyllfluoreszenz-Analysen zeigten, dass sowohl eine unzureichende Versorgung mit Wasser als auch ein anhaltender Wasserüberschuss zu detektierbarem Stress an Bäumen führen kann. Auch die relativen Blattwassergehalte zeigten Artenabhängigkeiten und standortbedingte Unterschiede. Mit den genutzten Methoden kann Stress an Einzelbäumen erforscht werden, jedoch ist eine städteweite Analyse nicht machbar. Um diese Herausforderung zu meistern, wurden Fernerkundungsdaten genutzt.

Aus den LiDAR-Daten (Abb. 4, links) wurden einzelne Baumkronen abgeleitet (Abb. 4, Mitte). Insgesamt wurden so 64.759 Bäume in Braunschweig und 49.243 in Brandenburg an der Havel identifiziert, wobei aufgrund der großen Rechenintensität der Auswerteschritte nur Teilbereiche der Städte analysiert werden konnten. Kronendurchmesser und Höhe wurden direkt aus den Polygonen und LiDAR-Daten abgeleitet. Die Pixel der Sentinel-2 Daten konnten in die drei Klassen Gras, Infrastruktur und Bäume entmischt werden. Mit diesem Modell konnten wir das reine Baumsignal aus den Misch-Pixeln extrahieren und den EVI berechnen. Beim Vergleich unserer Analysen mit dem Baumkataster von Brandenburg an der Havel konnten wir erste Zusammenhänge zwischen dem EVI und der Vitalität der Bäume sehen.

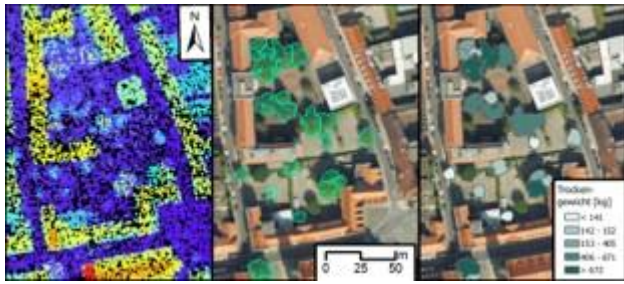


Abbildung 4: Die Rohdaten der Laserscandaten (links), die abgeleiteten Baumkronen (Mitte) und berechneten Trockengewichte (rechts). © M. Strohbach

Analysen des Baumwachstums im Verhältnis zum Standort zeigten, für manche Bäume ein verringertes Wachstum bei hoher Versiegelung. Es zeigte sich außerdem eine tendenzielle Abnahme der Wachstumsrate mit zunehmender Bestrahlungsstärke. Diese Erkenntnisse liefern wertvolle Hinweise für die Planung und Pflege nachhaltiger urbaner Grünflächen, indem sie den Einfluss von Umweltfaktoren auf die Gesundheit städtischer Bäume verdeutlichen. Extreme Versiegelung, kleine Pflanzgruben und fehlende Versickerungsflächen sollten nach Möglichkeit vermieden werden.

#### Kohlenstoffsequestrierung von Stadtbäumen

Die im Projekt entwickelten allometrischen Formeln basierend auf Baumhöhe und Kronendurchmesser stellen einen neuen Ansatz dar um stadtweite Berechnungen der in Stadtbäumen gespeicherten Trockenmasse durchführen zu können. Etwa 50 % der Trockenmasse von Bäumen sind Kohlenstoff. Ein Monitoring von Zuwächsen und Verlusten von Baumkronenfläche und Baumhöhen erlaubt somit ein Monitoring des in Stadtbäumen gespeicherten Kohlenstoffs.

Die Lebenszyklusanalyse ergab, dass neu gepflanzte Bäume zwischen 12 und 15 Jahren wachsen müssen, bevor sie die Emissionen durch Transport der Bäume aus der Baumschule, durch Vorbereitung der Pflanzgrube und ggf. durch Bewässerung wieder ausgeglichen haben. Erst ab diesem Zeitpunkt stellen diese Stadtbäume eine Kohlenstoffsenke dar. Pro Baum können bei einer Standzeit von 50 Jahren bis zu 1072 kg CO<sub>2</sub> sequestriert werden. Durch energetische Verwertung kann das Holz nach Ende der Lebenszeit fossile Treibstoffe ersetzen. Eine dauerhafte Speicherung des CO<sub>2</sub> könnte durch Bildung von Pflanzenkohle erreicht werden. Die Bilanzierung einzelner Bäume ergab, dass der Anlieferungsweg und die Bewässerung die zentralen Stellschrauben sind, um den Ausstoß von CO<sub>2</sub>-Äq zu verringern.

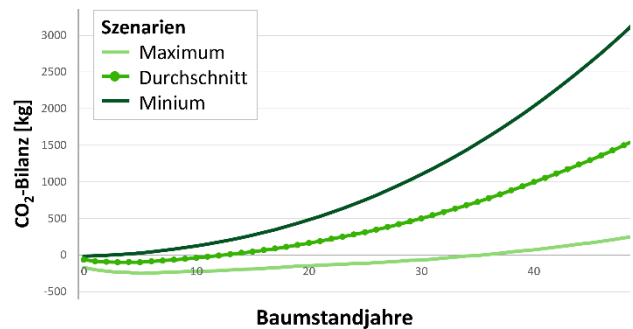


Abbildung 5: CO<sub>2</sub>-Bilanz von städtischer Pyramidenkieche. Negative Werte bedeuten, dass mehr CO<sub>2</sub>-Äq für Pflege aufgewendet werden muss, als der Baum in seiner Biomasse speichert. © J. Zagon & M. Strohbach (vorläufige Ergebnisse)

#### SCHLUSSFOLGERUNGEN

Um die Ökosystemleistungen zu maximieren, müssen Bäume langfristig an ihren Stadtstandorten stehen können. Stress und Vitalitätsverluste müssen schnell erkannt und dokumentiert werden. Der Einsatz von Geoinformationstechnologie im Stadtbaummanagement sollte überprüft werden. Bodengebundene und baumgebundene Analysen sollten mit Fernerkundungsdaten abgeglichen werden, um das Baumgesundheitsmonitoring auf der Stadtebene zu optimieren.

Die Versuchsergebnisse und Erkenntnisse aus dem Projekt wurden in dem Bericht „Förderung von Stadtbäumen - Erkenntnisse und Handlungsempfehlungen aus dem Projekt CliMax“ praxisorientiert zusammengefasst.

#### AUSGEWÄHLTE VERÖFFENTLICHUNGEN

Hörmann VJ et al. (2025): Urban tree drought stress: a practitioner-focused review of detection and monitoring methods. *Hydrological Processes* 39(10), doi. 10.1002/hyp.70298

Hoppenbrock, J et al. (under revision): Time-Lapse ERT Inversion for the Monitoring of Soil Water Content at Urban Tree Sites

Beiträge auf dem Fachsymposium Stadtgrün (BMLEH), European Geosciences Union (EGU) General Assembly, Tag der Hydrologie, KIDA-KON, Jahrestagung der GfÖ, Jahrestagung der Deutschen Gartenbaulichen Gesellschaft (DGG), etc.

#### Weitere Informationen:

<https://wissen.julius-kuehn.de/urbanes-gruen/themen/klimaschutz-durch-stadtgruen/climax>

#### HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN FÜR POLITIK UND PRAXIS

Monitoring und Schutz von Grundwasserressourcen in Verbindung mit der Erhebung urbaner Bewässerungsdaten zur bedarfsgerechten Planung und Optimierung zukünftiger Wassernutzungsstrategien für Stadtbäume.

Gezielte Weiterentwicklung von Open Access Baumkatastern und anderen Kartengrundlagen sowie die Festlegung von städtischen Grünflächenkennzahlen.

Städteweite Analysen der Baumstandorte nach ihrer „Zukunftsfähigkeit“ (Mindestgröße für Baumgruben festlegen). Förderung der Anpassung und Diversifizierung urbaner Baumbestände in Kombination mit dem Schutz alter Bäume zur Sicherung ihrer Kohlenstoffspeicherfunktion und ihrer klimaregulierenden (kühlenden) Wirkung.

In Zusammenarbeit mit:

**Stadt Brandenburg.**  
Umweltbewusst an der Havel

Stadt  **Braunschweig**

Gefördert durch:

 Bundesministerium  
für Landwirtschaft, Ernährung  
und Heimat

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

### Nützlinge in Agri-Photovoltaik-Systemen – Einfluss und Förderungspotenziale

Kathleen Lemanski und Annette Herz

#### ZIELSETZUNG

Im Zuge der Klimaschutzstrategie wird der Ausbau der erneuerbaren Energien vorangetrieben, wobei Photovoltaik (PV) die am schnellsten wachsende Energiequelle der Europäischen Union darstellt. Der zunehmende Flächenbedarf für PV-Anlagen steht jedoch in direkter Konkurrenz zur landwirtschaftlichen Nutzung ebenso wie zu ökologisch sensiblen Flächen. Die Agri-Photovoltaik (APV) ist ein vielversprechender Ansatz, diesen Landnutzungskonflikt durch eine multifunktionale Flächennutzung zu entschärfen. Neben der oft erwähnten Doppelnutzung der Fläche für die Energie- und landwirtschaftliche Erzeugung sollte jedoch ebenfalls der Einfluss auf und die Förderung der funktionellen Biodiversität innerhalb dieser Anlagen Beachtung finden. Diesbezüglich bestehen enorme Wissenslücken. Ein verändertes Mikroklima, aber auch physische Barrieren durch Konstruktion und Solarmodule haben Einfluss auf die Insekten. APV hat andererseits das Potenzial, durch Förderung von Nützlingen wichtige Ökosystemleistungen wie Bestäubung und Schädlingsregulierung zu liefern und somit ein Mehrwert für die Landwirtschaft. Daher wurde in dem vorliegenden Projekt „Solarnützlinge“ der Einfluss verschiedener APV-Anlagen auf Insekten untersucht. Zudem wurden Möglichkeiten aufgezeigt und erprobt, wie ökologische Maßnahmen in APV-Systeme integriert werden können, um die funktionelle Biodiversität zu fördern.

#### METHODIK

Zu Beginn des Projektes wurden bestehende APV-Anlagen eruiert. Dabei wurden Kontakte und Kooperationen zu unterschiedlichen Institutionen und Firmen aufgebaut (z. B. Fraunhofer ISE und Next2Sun GmbH). Nach der Besichtigung verschiedener Systeme und der Klärung über Nutzungsmöglichkeiten, wurden zwei hoch aufgeständerte – das eine über Äpfeln, das andere über Wein – und zwei vertikale Anlagen im Ackerbau als Versuchsstandorte ausgewählt (Abb. 1). In allen vier Anlagen war eine Referenzfläche ohne Anlage mit gleicher Kultur angrenzend oder in der näheren Umgebung vorhanden. Auf allen Flächen wurden Insekten aufgenommen. Zur ökologischen Aufwertung wurde in einer vertikalen APV-Anlagen unter den Modulen Blühstreifen angelegt (Abb. 1).



Abbildung 1: links: Hochaufgeständerte APV-Anlage über Wein in Freiburg. Rechts: Vertikale, bodennahe APV-Anlage mit einem mehrjährigen Blühstreifen unter den Modulen in Merzig.

Quelle: K. Lemanski / JKI-BI

#### HIGHLIGHTS

- Hochaufgeständerte APV-Systeme beeinträchtigen möglicherweise das Vorkommen von Fluginsekten.
- Bei bodennahen, vertikalen APV-Anlagen hat die Gestaltung der Untermodulstreifen einen enormen Einfluss auf das Insektenvorkommen. Durch ihre ökologisch sinnvolle Ausgestaltung können Insekten und die damit verbundenen Ökosystemleistungen in der Landwirtschaft erhöht werden.

#### ERGEBNISSE

##### Hochaufgeständerte APV-Anlagen

Auf den beiden hochaufgeständerten APV-Anlagen war durchschnittlich weniger Insektenbiomasse unter den Modulen festzustellen (Abb. 2 A). Dies traf ebenfalls auf die Individuenzahlen der meisten Taxa zu (z. B. Schwebfliegen; Abb. 2 B). Bei den parasitoiden Hymenopteren zeigten sich Standort-spezifische Unterschiede der Anlagen. Während sie an der Obstbaufläche unter den Modulen vermehrt vorkamen (Abb. 2 B), zeigten sie auf der Weinbaufläche (ohne Abb.) denselben negativen Trend unter den Modulen, wie die restlichen untersuchten Taxa.

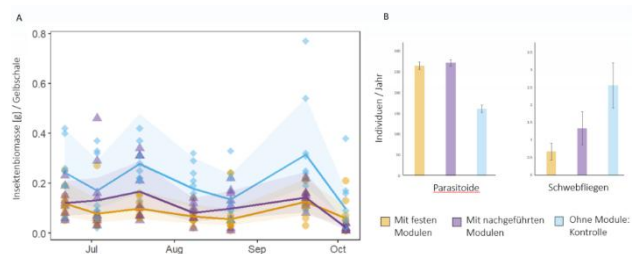


Abbildung 2: A) Insektenbiomasse über das Jahr 2023. B) Anzahl an parasitoiden Hymenopteren und Schwebfliegen im selben Jahr pro Gelbschale in einer hochaufgeständerten Versuchs-APV-Anlage des KOB (Bavendorf, Baden-Württemberg).

##### Bodennahe APV-Anlagen

In den vertikalen APV-Anlagen ist das Bild gemischter. Die Ergebnisse hängen vom Standort, der Kultur, dem Jahr und besonders der Insektengruppe ab. Dies hängt vermutlich stark mit der Untermodulnutzung zusammen. Es zeigte sich deutlich, dass das Anlegen eines Blühstreifens unter den Modulen (Abb. 1) einen positiven Einfluss auf das Insektenvorkommen im Kulturstreifen hat. Die Grasstreifen unter den Modulen bilden je nach Alter und Pflege sehr unterschiedliche Strukturen. Während bestimmte Insektengruppen in vertikalen APV-Anlagen mit reinem Weidelgrasstreifen im Vergleich zum Kontrollfeld (ohne APV) geringe Dichten aufweisen, ist dies bei älteren und diverseren Grasstreifen (durch Einwandern von weiteren Pflanzen) nicht mehr gegeben (Tab. 1). Das legt die Vermutung nahe, dass vertikale APV-Anlagen ohne Nutzung der Untermodulstreifen vermutlich einen negativen Effekt auf Insekten oder einzelne Insektengruppen haben, sobald



## KLIMAWIRKUNG

Durch Agri-Photovoltaik wird Landwirtschaft und Energiegewinnung auf einer Fläche kombiniert, um Landnutzungseffizienz zu erhöhen und Landnutzungskonflikte zu vermeiden. Somit kann der Ausbau erneuerbaren Energien weiter vorangetrieben werden. Ebenfalls können diese Systeme als Kulturschutz gegen Extremwetterbedingungen dienen.

Durch entsprechende Gestaltung von APV-Systemen können diese Ökosystemleistungen (wie z. B. Schädlingsregulierung und Bestäubung) erbringen und so zu einer Stärkung des Naturhaushaltes und seiner Anpassung an den Klimawandel beitragen.

dieser aber ökologisch attraktiv wird, kehrt sich dieser Effekt ins Gegenteil um.

Um eine ökologische Ausgestaltung von vertikalen APV-Anlagen darzustellen, wurden aus bestehender Literatur Maßnahmen (ohne APV) zusammengetragen und konzeptionell in das APV-System übertragen (Abb. 3).

Tabelle 1: Mittelwerte der über das Jahr 2024 gefangen Insektenbiomasse und Großgruppen in Gelbschalen auf der vertikalen APV-Anlage in Merzig (Saarland) mit Winterweizen

	UM	IB	PH	SF	MK	B	BL
APV	Blüh	0.76	28.19	0.38	0.24	2.86	3.90
	Gras	0.60	17.90	0.33	0.14	2.76	4.81
Kontrolle	---	0.50	16.77	0.03	0.10	1.50	1.43

UM: Untermodulnutzung (Blüh- oder Grasstreifen), IB: Insektenbiomasse [g], Anzahl der PH: parasitoiden Hymenopteren, SF: Schwebfliegen, MK: Marienkäfer, B: Bienen und BL: Blattläuse.

## SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die unterschiedlichen APV-Anlagen stellen eine Möglichkeit da, die Landnutzungseffizienz zu erhöhen und somit den Anbau der erneuerbaren Energien weiter voranzubringen. Allerdings sollte die funktionelle Biodiversität, die - durch erbrachte Ökosystemfunktionen- wie Bestäubung und Schädlingsregulierung durch Nützlinge- eine wichtige Funktion in der Landwirtschaft hat, nicht außer Acht gelassen werden. Daher ist es wichtig den tendenziell negativen Einfluss von APV-Systemen auf Insekten mit entsprechenden Maßnahmen entgegen zu treten

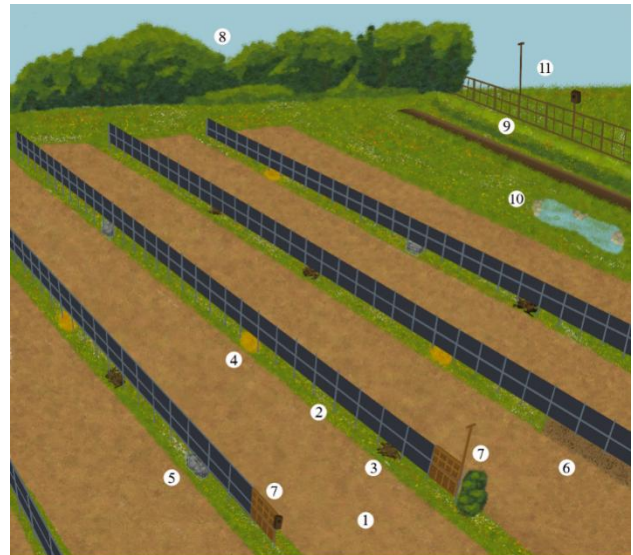


Abbildung 3: Mögliches Design einer ökologisch aufgewerteten vertikalen APV-Anlage. Maßnahmen: (1) z. B. reduzierte Bodenbearbeitung, (2) Blühstreifen, (3) Totholzhaufen, (4) Strohballen, (5) Steinhaufen, (6) unbedeckter Boden, (7) Nistkästen (Insekten/Vögel), Sitzstangen, Sträucher und „Biodiversitätsmodul“, (8) Hecken, (9) Erdhügel und (10) kleine Teiche, (11) Nistkästen (Insekten/Vögel) und Sitzstangen für Greifvögel. Maßnahmen sind nicht maßstabgetreu.

## AUSGEWÄHLTE VERÖFFENTLICHUNGEN

- <https://www.praxis-agrar.de/umwelt/biologische-vielfalt/agri-photovoltaik-systeme-zur-foerderung-der-biodiversitaet>

### Weitere Informationen:

<https://wissen.julius-kuehn.de/klimaschutz/projekte/verbesserung-der-biologischen-vielfalt/solarnuetzlinge>

## Handlungsempfehlungen für Politik und Praxis

APV-Systeme haben das Potenzial, eine nachhaltigere Energieversorgung in Deutschland zu schaffen. APV-Anlagen (besonders hochaufgeständerte) können jedoch einen negativen Effekt auf verschiedene Insektengruppen haben.

Die Vielfalt der APV-Systeme spiegelt die rasante Weiterentwicklung in diesem Sektor wider. Dabei sollte die Förderung der (funktionellen) Biodiversität bereits in der Entwicklungsphase mitgedacht werden.

Jede Fläche, die nicht ertragsorientiert bewirtschaftet wird, durch APV-Strukturen oder als Abstandsfläche zu diesen, kann bei entsprechender Gestaltung zu der Erhöhung der Artenvielfalt und Ökosystemleistungen beitragen. Die ökologische Ausgestaltung ist momentan allerdings noch mit einem teils großen Pflegeaufwand verbunden, da es bisher kaum mechanisierte Lösungen gibt.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Landwirtschaft, Ernährung  
und Heimat

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



## Treibhausgasneutrales Deutschland: Auswirkungen auf Wirtschaft und Lebensverhältnisse in ländlichen Räumen

Alexandru Brad, Stefan Becker, Fenja Guhl, Patrick Küpper, Israel Garcia Dominguez und Martin Simmler

### ZIELSETZUNG

Drei Zielbündel wurden verfolgt: Erstens sollten die Auswirkungen der Klimaschutzpolitik in den Bereichen Siedlungsentwicklung, Mobilität, Gebäude, Energie auf die Lebensverhältnisse (d. h. Wohnen, Einkommen, Infrastruktur, Umwelt) in ländlichen Räumen untersucht werden. Ziel war es, den Einfluss verschiedener Politikansätze zu analysieren, mögliche Wirkungsketten zu identifizieren und die Wahrscheinlichkeit unterschiedlicher Entwicklungspfade abzuschätzen.

Zweitens galt es, die potenziellen Auswirkungen des Übergangs zur Treibhausgasneutralität auf die ländliche Wirtschaft besser zu verstehen.

Drittens wurde der Frage nachgegangen, inwieweit Klimaschutz Eingang in regionale und lokale Entwicklungsprozesse findet und welche Faktoren dafür ausschlaggebend sind. Im Fokus standen LEADER und Dorfentwicklung als Maßnahmen der ländlichen Entwicklung mit Bottom-up-Ansatz. Ziel war es, Empfehlungen für Politik und Förderpraxis zu entwickeln, um die Integration von Klimaschutz zu fördern.

### METHODIK

Zur Ermittlung der Auswirkungen auf die Lebensverhältnisse wurde zunächst ein Scoping-Review durchgeführt. Aus einem Literaturpool von 23.899 internationalen wissenschaftlichen Studien, die zwischen 2000 und 2023 veröffentlicht wurden, wurden 63 Studien identifiziert, die Korrelationen zwischen Klimaschutzmaßnahmen und Veränderungen der Lebensverhältnisse aufzeigen. Im Anschluss an die Recherche wurden 19 Klimaschutzmaßnahmen in Bezug auf den deutschen Kontext entworfen. Die Wahrscheinlichkeit der Umsetzung, die Klimaschutzwirkung, die Auswirkung auf die Lebensverhältnisse und die räumlichen Effekte der Maßnahmen wurden in einer Delphi-Befragung (N > 50 in beiden Runden) und in drei Expertenworkshops untersucht. Die Einschätzungen der Expertinnen und Experten wurden zur Erstellung von Zukunftsszenarien herangezogen.

Zur Untersuchung der Auswirkungen des Übergangs zur Treibhausgasneutralität auf die Wirtschaft wurden eine Literaturrecherche und eigene empirische Arbeiten durchgeführt.

Zur Untersuchung der Bedeutung von Klimaschutz in regionalen und lokalen Entwicklungsprozessen wurden vergleichende Fallstudien (drei für LEADER und drei für Dorfentwicklung) durchgeführt. Bei der Auswahl der Fälle wurden unterschiedliche förderrechtliche Vorgaben und sozioökonomische Bedingungen berücksichtigt. Zunächst wurden die Entwicklungsstrategien hinsichtlich der Klimaschutzintegration analysiert. Um vertiefende Einblicke in die Entstehung der Strategien und die Determinanten der Klimaschutzintegration zu erhalten, wurden insgesamt 33 Interviews mit Stakeholdern (Regionalmanagements, Planungsbüros, Akteure aus Politik, Verwaltung, Wirtschaft und Zivilgesellschaft) durchgeführt.

### HIGHLIGHTS

- Die internationale Literatur zu den Auswirkungen der Klimaschutzpolitik auf die Lebensverhältnisse in ländlichen Räumen ist in vielen Bereichen unvollständig.
- Klimaschutz muss eine Balance zwischen Wirksamkeit, Akzeptanz und finanziellen Möglichkeiten finden.
- Das verarbeitende Gewerbe ist stärker in ländlichen Räumen vertreten. Der Übergang zur Treibhausgasneutralität wirkt sich durch höhere Energiepreise auf die Wirtschaft aus.
- Die Beschäftigung im verarbeitenden Gewerbe hängt nur bedingt von Energiekosten ab, da Unternehmen in der Lage sind, diese zumindest teilweise auf deren Kunden abzuwälzen.
- Die u. a. durch CO<sub>2</sub>-Abgaben gestiegenen Kosten des Straßengüterverkehrs wirken sich deutlich auf die Beschäftigung aus, insbesondere im verarbeitenden Gewerbe.
- Zwei Policy Briefs mit detaillierten Handlungsempfehlungen für LEADER und Dorfentwicklung wurden veröffentlicht, um die Integration von Klimaschutz zu stärken.

### ERGEBNISSE

Aus der Literaturrecherche zu den Auswirkungen des Klimaschutzes auf die Lebensverhältnisse ließen sich drei Schwerpunkte identifizieren. Erstens konnte eine Steigerung der Immobilienpreise als Konsequenz der Innenentwicklungs- und Energieeffizienzmaßnahmen festgestellt werden. Zweitens wurde gezeigt, dass Klimaschutzmaßnahmen zur Verbesserung der Einkommen führen könnten: zum einen durch Pachteinnahmen im Zuge des Aufbaus erneuerbarer Energien und zum anderen in Bezug auf kompakte Siedlungsstrukturen mit gemischten Nutzungen, die die Erreichbarkeit von Arbeitsplätzen verbessern. Eine dritte Auswirkung der Klimaschutzpolitik betrifft die Infrastruktur, deren Erreichbarkeit und finanzielle Tragfähigkeit insbesondere durch Innenentwicklungsmaßnahmen steigt. Besonders widersprüchlich ist die Literatur zum Thema Ausbau der Windenergie: Teils korreliert der Windkraftausbau positiv mit der Zahl der Arbeitsplätze, der Qualität der Infrastruktur und der Lärmbelästigung, teils werden die Auswirkungen als unbedeutend eingestuft. Hinsichtlich der Immobilienpreise und der Landschaftsqualität wird einerseits eine Verringerung und andererseits keine signifikanten Auswirkungen nachgewiesen.

In einem zweiten Schritt wurden drei Zukunftsszenarien entworfen. Das Trend-Szenario fasst eine Auswahl wahrscheinlicher Maßnahmen zusammen, von denen jedoch nicht alle eine hohe Klimaschutzwirkung aufweisen. Der

## KLIMAWIRKUNG

Die gewonnenen Erkenntnisse zu Synergien und Zielkonflikten zwischen Klimaschutz und ländlicher Entwicklung können von den Ländern bei der Programmplanung für die Politik zur Entwicklung ländlicher Räume genutzt werden. Des Weiteren können regionale Akteure aus den Erkenntnissen lernen. Schließlich wäre es möglich, dass die Bundesregierung die Erkenntnisse für die weitere Ausgestaltung ihrer Klimaschutzpolitik nutzt.

Ausbau digitaler Infrastrukturen und Angebote ist eine zentrale Maßnahme, von der vor allem dünn besiedelte Regionen profitieren. In diesen Orten werden die Pendelkosten sinken und die Erreichbarkeit vieler Dienstleistungen steigen. Der Klimaschutzbeitrag dieser Maßnahme ist allerdings eher als mäßig einzuschätzen, da der Freizeit- und Lieferverkehr wahrscheinlich steigen werden.

Im Klimaschutz-Szenario setzt Deutschland eine ambitionierte Klimaschutzpolitik um. Dies ist allerdings mit einem Anstieg der Lebenshaltungskosten in ländlichen Räumen verbunden. Ein zentraler Faktor ist die starke Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Bepreisung im Vergleich zu den Löhnen, die kurzfristig zu einer starken Steigerung der Lebenshaltungskosten führen wird. Besonders betroffen sind ländliche Räume, da dort die Heizungs- und Mobilitätskosten höher sind. Um sozialen Verwerfungen und mangelnder Akzeptanz entgegenzuwirken, ist kurzfristig ein sozialer Ausgleich notwendig. Langfristig führen allerdings höhere CO<sub>2</sub>-Preise zu einem starken Ausbau der CO<sub>2</sub>-neutralen Energieversorgung.

Im Lebensverhältnisse-Szenario wird eine Klimaschutzpolitik umgesetzt, die explizit auf gleichwertige Lebensverhältnisse abzielt. Eine Schlüsselmaßnahme ist die Förderung von Wohngebäudesanierungen, sodass bis 2045 alle Gebäude saniert sind. Dadurch steigt die Wohnqualität und die Energiekosten sinken. Diese Maßnahme kommt ländlichen Räumen besonders zugute, da dort der Wohnraum pro Kopf höher ist als in verdichteten Bereichen. Die staatliche Förderung nutzt Mietern und Eigentümern, belastet aber die öffentlichen Haushalte.

Zur Untersuchung der Auswirkungen auf die Wirtschaft wurden drei Wirkungskanäle betrachtet. Diese machen 74 % der THG in Deutschland aus (siehe Tab. 1).

Tabelle 1: THG Emissionen in Deutschland, 1990 bis 2024

Sector	Share 2024 in %	Change 1990-2024 relative to 1990 in %	Change 2010-2024 relative to 1990 in %
Energy Industry	28.5	-61	-39
Industry	23.5	-45	-11
Transport	22.0	-12	-5
Buildings	15.4	-52	-20
Agriculture	9.5	-27	-7
Waste	1.0	-87	-16
Total	100	-48	-22

Notes: Emission of greenhouse gases covered by the UN Framework Convention on Climate, excluding land use, land use change and forestry.

1) Die Dekarbonisierung des Energiesektors – von zentralisierter „schmutzige“ Energie zu zumindest teilweise dezentralisierter grüner Energie – ist in vollem Gange und hat seit 1990 die Emission um 61 % reduziert. Auch wenn die Erzeugung grüner Energie in ländlichen Räumen einen hohen Stellenwert einnimmt, wirkt sich dieser Wandel nur geringfügig auf die ländliche Wirtschaft aus. Aufgrund der

Ausgestaltung des deutschen Energiemarktes gibt es keinen Zusammenhang zwischen lokaler Energieproduktion und Energiepreisen. Zudem werden in der Literatur Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien zwar positive Beschäftigungseffekte zugesprochen, diese beschränken sich jedoch auf die Bauphase. Auch ist hervorzuheben, dass der Beschäftigungsanteil von Versorgungsunternehmen weniger als 1 % beträgt.

Eine veränderte Ausgestaltung der Energiemärkte könnte diese Einschätzung beeinflussen. Während lokale Energiepreise die Beschäftigung in ländlichen Räumen erhöhen könnten, würde eine stärkere Anwendung des Nutzerprinzips bei der Zuweisung von Energienetzkosten zu gegenläufigen Effekten führen, da diese in ländlichen Gebieten höher sind.

2) Es besteht die Vermutung, dass steigende Energiepreise die Wettbewerbsfähigkeit energie-intensiver Unternehmen schwächt. Die Literatur zur Emissionsregulierung in den USA legt dies nahe, für den europäischen Emissionshandel gibt es jedoch keine Evidenz. Unsere eigene Arbeit zeigt, dass auch Unternehmen in Europa von Emissionsregulierung betroffen sind. Negative Beschäftigungseffekte ergeben sich jedoch nur im Energiesektor. Firmen im produzierenden Gewerbe können die damit einhergehenden Kosten auf ihre Kunden abwälzen. Deren Anzahl der Beschäftigten steigt zudem sogar leicht, was durch arbeitsintensive Technologien zur Emissionsminderung erklärt werden kann.

Die Treibhausgasemissionen des verarbeitenden Gewerbes sind seit 1990 rückläufig, jedoch sind weitere Anstrengungen erforderlich, insbesondere im Zusammenhang mit der Wärmeerzeugung. Aktuelle Entwicklungen deuten auf einen Wechsel zu Wasserstoff hin. Da das Wasserstoffnetz räumlich begrenzt ist, werden nahe am Netz ansässige Firmen Wettbewerbsvorteile genießen.

3) Der Straßengüterverkehr ist für etwa 40 % der THG-Emissionen im Verkehrssektor verantwortlich, der verbleibende Teil stammt größtenteils aus dem privaten Pkw-Verkehr. Die Literatur legt nahe, dass der Pendlerverkehr kurzfristig kaum auf Kraftstoffpreisänderungen reagiert. Dies deutet darauf hin, dass der Übergang zu Treibhausgasneutralität nur geringe Auswirkungen auf Pendlerverhalten und Beschäftigung hat. Die langfristigen Auswirkungen sind möglicherweise stärker, da Menschen ihre Wohnortwahl anpassen könnten. Die Literatur zum Straßengüterverkehr ist wenig umfangreich. Eigene Analysen deuten auf einen deutlichen Einfluss hin: Ein Anstieg der Transportkosten um 1 % reduziert die Beschäftigung materialintensiver Firmen (verarbeitendes Gewerbe und Bauwesen) um 1 %.

Die untersuchten Fallstudien zu lokalen und regionalen Entwicklungsprozessen lassen erkennen, dass die Klimaschutzintegration deutlich variiert. Verbindliche förderrechtliche Vorgaben spielen dabei eine zentrale Rolle. Weiche Anreize (z. B. höhere Fördersätze, Leitfäden) entfalten hingegen nur eine begrenzte Steuerungswirkung, weil sie entweder unbekannt oder im Verhältnis zu anderen Faktoren schwach ausgeprägt sind. Auch sozioökonomische Bedingungen prägen die Klimaschutzintegration in hohem Maße. In strukturschwachen Dörfern und Regionen wird Klimaschutz gegenüber anderen Themen wie Wohnen und Infrastruktur als nachrangig behandelt. Eine wichtige Rolle spielen zudem unterstützende Strukturen wie

Klimaschutzkonzepte. Wo diese bestehen und von den Beteiligten einbezogen werden, können sie einen positiven Einfluss entfalten. Die Fallstudien zeigen darüber hinaus die Bedeutung von Lernprozessen und Pfadabhängigkeiten. Insbesondere in den LEADER-Regionen wirken sich Erfahrungen aus früheren Förderperioden aus. So wurden etwa Klimabudgets in der vorherigen Förderperiode nicht ausgeschöpft, was zu einem geringerem Budgetansatz in der neuen Förderperiode führte.



Abbildung 1: e-Umweltmobil Holly – ein über LEADER gefördertes Projekt in einer der Fallregionen, Quelle: Björk Movies.

Neben institutionellen und strukturellen Faktoren spielen auch die lokalen Akteurskonstellationen eine entscheidende Rolle. Engagierte Akteure wie z. B. Bürgermeister\*innen können die Integration von Klimaschutz ebenso stärken wie die fachliche Expertise von Klimaschutzmanagements oder kompetenten Planungsbüros.

## SCHLUSSFOLGERUNGEN

Es wurde deutlich, dass der Forschungsstand zum Thema Auswirkungen der Klimaschutzpolitik auf die Lebensverhältnisse in ländlichen Räumen im großen Teil uneindeutig und unvollständig ist. Solche Auswirkungen lassen sich nicht pauschal voraussagen und hängen von vielen kontextgebundenen Faktoren ab. Zudem weist die Mehrheit der Forschung zu diesem Thema keine Kausalitäten nach, sondern hebt lediglich Korrelationen hervor.

Aufgrund der entworfenen Szenarios wurden unterschiedliche Schwerpunkte der Klimaschutzpolitik erkundet. Eine wichtige Erkenntnis ist, dass es Potenzial gibt, die Lebensverhältnisse in ländlichen Räumen durch die Klimapolitik langfristig zu verbessern, etwa durch Verbesserungen im Wohnkomfort, Erreichbarkeit der Dienstleistungen, oder Einkommen. Somit erscheint es grundsätzlich möglich, negative Auswirkungen in anderen Bereichen durch Maßnahmen mit positiven Auswirkungen in Einklang zu bringen.

Die Auswertungen haben ergeben, dass sich die größte Auswirkung der Umstellung auf THG-Neutralität für die ländliche Wirtschaft voraussichtlich durch die Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs ergibt. Die Beschäftigung materialintensiver Unternehmen hängt stark von den Transportkosten ab, und materialintensive Unternehmen sind eher in ländlichen Räumen angesiedelt. Da die Dekarbonisierung der Wärmeerzeugung eine Nutzung von Wasserstoff beinhaltet, wird die Entfernung zum Wasserstoffnetz auch eine wichtige Rolle für die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen spielen.

Die derzeitige Ausgestaltung des Energiemarktes führt zu einer eher ähnlichen Betroffenheit von Räumen durch grüne Politiken, Änderungen in der Ausgestaltung können dies jedoch jederzeit ändern.

Die Untersuchungen zur Integration von Klimaschutz in lokalen und regionalen Entwicklungsprozessen konnten zeigen, dass diese von einem Wechselspiel unterschiedlicher Faktoren abhängt. Neben förderrechtlichen Vorgaben können sozioökonomische Bedingungen ebenso eine Rolle spielen wie die Akteurskonstellation vor Ort. Grundsätzlich stehen verbindliche Anforderungen dabei in einem Spannungsfeld zum Bottom-up-Ansatz. Entscheidend ist daher, den lokalen Gestaltungsspielraum zu wahren, aber gleichzeitig die Möglichkeiten zur Klimaschutzintegration zu stärken.

## AUSGEWÄHLTE VERÖFFENTLICHUNGEN

- Guhl F, Becker S, Küpper P (2025): So lässt sich LEADER in Klimaschutz integrieren – ein Policy Brief. Thünen à la Carte 14. doi. 10.2478/wd-2025-0109
- Brad A, Wöhler GL, Küpper P (eingereicht): Effects of Climate Change Mitigation Policies on Living Conditions in Rural Areas: A Scoping Review. Sociologia Ruralis.
- Guhl F, Becker S, Küpper P (eingereicht): Climate policy integration in regional and local development strategies: Evidence from LEADER and village development in Germany. Journal of Rural Studies.

## Weitere Informationen:

<https://www.thuenen.de/de/institutsuebergreifende-projekte/treibhausgasneutrales-deutschland-auswirkungen-auf-wirtschaft-und-lebensverhaeltnisse-in-laendlichen-raeumen>

## HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN FÜR POLITIK UND PRAXIS

Angesichts der Bedeutung von Energie- und Transportkosten für die lokale Beschäftigung und der Bedeutung energie- und materialintensiver Unternehmen für die ländliche Wirtschaft sollten sich politische Entscheidungsträger der regionalen wirtschaftspolitischen Dimension von Energiepolitik bewusst sein. Daher sollten nicht nur Entscheidungen zur Ausgestaltung des Energiemarktes, sondern auch der Aufbau neuer Energieinfrastruktur sorgfältig im Hinblick auf räumlich differenzierte Effekte bewertet werden.

Die Länder sollten Vorgaben zur Integration von Klimaschutz in ländliche Entwicklung vorsichtig nutzen und stärker auf weiche Anreize setzen. Dazu zählen finanzielle Anreize wie höhere Förderquoten und -höchstsummen (LEADER) oder die Einführung von explizit klimarelevanten Fördergegenständen (Dorfentwicklung). Die Akteure vor Ort sollten frühzeitig Klimaexpertise in die Strategie- und Projektentwicklung einbinden. Diese können als Klimaanwälte oder Themenverantwortliche fungieren und dafür Sorge tragen, dass Klimaschutz den Prozess über präsent bleibt. Praktische Instrumente wie « Klima-Checks » können dabei helfen, die Klimawirkung der Projektvorhaben im Vorfeld grob einzuschätzen.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Landwirtschaft, Ernährung  
und Heimat

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



## Wiedervernässung von Agrargewässern als Klimaschutz-Sofortmaßnahme

Corinna Borchard, Karin Meinikmann, Stefan Lorenz und Marlen Heinz

### ZIELSETZUNG

Durch den Klimawandel verursachte längere und wärmere Trockenperioden führen bei einer steigenden Anzahl von kleinen (<1 ha) stehenden Gewässern in der Agrarlandschaft nicht nur häufiger, sondern auch länger zu Austrocknung. Auf einer Gesamtfläche von ca. 45.000 ha erfüllen Kleingewässer in Deutschland eine Vielzahl an Ökosystemleistungen. Der Einfluss auf Treibhausgas-Emissionen und damit assoziiertes Klimaschutzpotenzial rückt hierbei zunehmend in den Fokus.

Frühere Studien haben gezeigt, dass insbesondere Gewässerbereiche die nur zeitweise überflutet sind, mehr CO<sub>2</sub> emittieren als Gewässer mit permanenter Wasseroberfläche. In Hinblick auf Treibhausgas-Emissionen spielt somit nicht nur die Persistenz der Gewässer über die Folgejahre eine entscheidende Rolle, sondern auch die Länge der Hydroperiode im Jahresgang. Ziel dieses Projektes ist es, den Einfluss einer Wiedervernässungsmaßnahme auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen zu ermitteln und hinsichtlich der Klimarelevanz zu bewerten.

### METHODIK

Ein trocken gefallenes Agrargewässer wurde im November 2022 im Rahmen einer Revitalisierungsmaßnahme durch den landwirtschaftlichen Betrieb „Schlossgut Alt Madlitz GmbH & Co. KG“ (Projektpartner) bis zum mineralischen Unterboden entschlammt. Das Entfernen des organischen Sediments vertiefte das Gewässer, begünstigte den Zustrom oberflächennahen Grundwassers und ermöglichte somit die Wiederherstellung des trocken gefallenen Gewässers. Im Rahmen dieses Projektes wurde das Gewässer in den Jahren 2023 und 2024 monatlich untersucht, um verschiedene hydrologische Phasen (Maximalfüllstand, Austrocknung, Minimalfüllstand, Wiedervernässung) zu erfassen. In 2025 wurden im April, Juli und September ergänzende Messungen durchgeführt.

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen (= CO<sub>2</sub>-Flux) wurden mittels in situ Infrarot-Gasanalyse (EGM-5, PP-Systems) entlang zweier Transekte jeweils im wiedervernässen und in einem nahe gelegenen Referenz-Gewässer ermittelt. Um Daten über Boden und Wasser zu erheben, kamen hierbei Boden- und schwimmende Messkammern zum Einsatz. Ab Frühjahr 2024 ermöglichte die Verwendung transparenter *canopy chambers* die Messung des netto-CO<sub>2</sub>-Flux. Um mögliche Treiber vermindelter oder erhöhter Emissionen aus Gewässern zu identifizieren, erfolgte an jedem Messtag das Monitoring biogeochemischer Begleitparameter (z. B. Nährstoffe, Temperatur, pH, O<sub>2</sub>-Gehalt). Veränderungen der Gewässeroberfläche (Uferlinie, Vegetation) wurden anhand von Luftbildern ermittelt.

### HIGHLIGHTS

- Durch die Wiedervernässungsmaßnahme emittiert signifikant weniger CO<sub>2</sub> aus dem renaturierten Gewässer im Vergleich zu Emissionen vor der Entschlammung und zum trocken gefallenem Referenz-Gewässer
- Jahresgang und Habitat haben einen maßgeblichen Einfluss auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen

### ERGEBNISSE

#### Gewässerdynamik

Seit Beginn 2023 weist das entschlammt Gewässer eine permanente Wasseroberfläche auf, die zwischen den Jahren und im Jahresgang starken Schwankungen unterlag (Abb. 1). In den ersten Monaten nach der Entschlammung (Winter 2022/2023) wurde das Gewässer durch eine Rohrdrainage gespeist, was maßgeblich zur Ausbildung des gemessenen maximalen Wasserstands (max. Wasserfläche: 452 m<sup>2</sup>; max. Tiefe: 2.0 m) beitrug und den Umfang überstieg, der allein aus Niederschlag und Zufluss des oberflächennahen Grundwassers erklärbar wäre. Im Frühjahr 2024 war der Einfluss der Drainage geringer und die Gewässeroberfläche war ~22 % kleiner als im Frühjahr 2023. Veränderungen der Gewässeroberfläche zwischen Maximalfüllständen im Frühjahr 2024 und 2025 waren mit einer ~7 % kleineren Fläche in 2025 weniger stark.

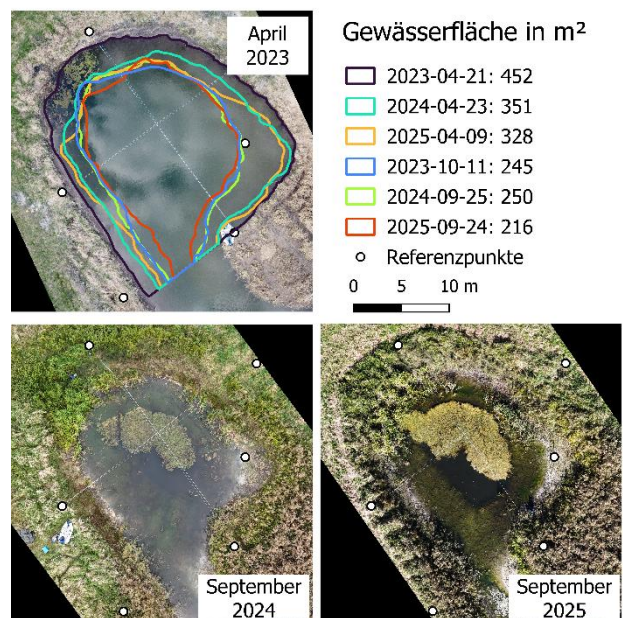


Abbildung 1: Gewässeroberfläche (m<sup>2</sup>) des Management-Gewässers zum Maximalfüllstand (April 2023) und Minimalfüllstand (September) in den Jahren 2024 und 2025. Fotos: Corinna Borchard und Manuel König, JKI

Während das Referenz-Gewässer im Jahr 2023 durch die anhaltende Dürre nahezu vollständig ausgetrocknet war, zeigten sich in 2024 veränderte hydrologische Bedingungen und es gab kleine, überstaute Areale mit einer maximalen Tiefe von 40 cm.



### Nährstoffdynamik und biogeochemische Begleitparameter

Das Oberflächenwasser des Management-Gewässers wies im Frühjahr 2023 höhere  $\text{NO}_3^-$ -Werte auf als in den Folgejahren. Dies ist vermutlich auf den Einfluss der Drainage zurückzuführen, die im Gegensatz zum oberflächennahen Grundwasser ebenfalls hohe  $\text{NO}_3^-$ -Konzentrationen enthielt. Ab Sommer 2023 war keine sichtbare Verbindung mehr zwischen Drainage und Gewässer festzustellen und die  $\text{NO}_3^-$ -Konzentrationen waren in den Folgejahren zunehmend geringer. Höchste  $\text{PO}_4^{3-}$ -Konzentrationen im Jahresverlauf waren im Juli 2023 und Mai 2024 vorhanden und nach abnehmenden Konzentrationen ab spätestens August nicht mehr messbar. Anhand der Chlorophyll *a*-Konzentration wurden im August 2023, Ende Juli 2024 und im Juli 2025 unterschiedlich stark ausgeprägte Algenblüten identifiziert. Im Sommer 2024 wies das Gewässer hohe pH-Werte und hohe  $\text{O}_2$ -Werte auf, die auf intensive Photosynthese-Aktivität hindeuten. 2025 waren pH und  $\text{O}_2$  zum Zeitpunkt höchster chl *a*-Konzentrationen geringer; ein Indiz, dass sich die Gewässer-Dynamik in 2025 von den Vorjahren unterscheidet. Dies zeigte sich auch in einer veränderten Plankton-Gemeinschaft und der Vegetationsentwicklung: 2025 war der Anteil an Diatomeen, Cryptophyceen und Cyanobakterien höher als in den Vorjahren, in denen Grünalgen dominierten. Seit 2023 wuchsen am Gewässergrund Gemeinschaften submerser Makrophyten und seit 2024 entwickelten sich zusätzlich schwimmende Makrophyten, die zu ihrer stärksten Ausbreitung im Spätsommer 2025 rund 15 % des Gewässers bedeckten.

### Einfluss der Wiedervernässung auf die $\text{CO}_2$ -Emissionen

Die Wiedervernässungsmaßnahme führte zu deutlich verringerten  $\text{CO}_2$ -Emissionen aus dem Management-Gewässer; sowohl im Vergleich zu Emissionen vor der Entschlammung (Oktober 2022), als auch im Vergleich zu den Emissionen aus dem trocken gefallenem Referenz-Gewässer (Tab. 1, Abb. 2). Sowohl das Management- als auch das Referenz-Gewässer waren während des gesamten Beobachtungszeitraums eine Quelle für  $\text{CO}_2$  – allerdings mit einer sich deutlich unterscheidenden Intensität: Mit  $\text{CO}_2$ -Fluxen von  $26.7 \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$  (Median,  $n = 1049$ ) am Management-Gewässer gegenüber  $343 \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$  (Median,  $n = 1358$ ) am nicht wiedervernässten Referenz-Gewässer zeigte sich der Effekt der Wiedervernässungsmaßnahme deutlich (Tab. 1).

### $\text{CO}_2$ -Emissionen im Jahresverlauf

Im Jahresverlauf zeigten die  $\text{CO}_2$ -Emissionen beider Gewässer eine ausgeprägte Saisonalität mit geringen Emissionen im Winter/Frühjahr und Maximalwerten im Verlauf der warmen Sommermonate (Abb. 2). In den Sommermonaten war die Spannweite der Messwerte an beiden Gewässern groß, mit höchsten Emissionen über Boden und geringsten Emissionen über Wasser.

Tabelle 1:  $\text{CO}_2$ -Emissionen (=  $\text{CO}_2$ -Flux) des Management- und des Referenz-Gewässers aus Boden- und Wasser-Habitaten für Oktober 2022, (vor Entschlammung), Oktober der Folgejahre und für alle Messwerte im gesamten Jahresverlauf (2023-2025). Gezeigt sind Median, sowie Minimal- und Maximal-Werte (in situ Messungen in regelmäßigen Abständen entlang der zwei Transekte).

	Management-Gewässer $\text{CO}_2$ -Flux ( $\text{mmol m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$ )	Referenz-Gewässer $\text{CO}_2$ -Flux ( $\text{mmol m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$ )
Oktober 2022 (vor Entschlammung)	Median: 443 $n = 99$ Min- Max: 179 – 1165	Median: 292 $n = 98$ Min- Max: 89 – 588
Oktober 2023 und 2024	Median: 18.5 $n = 115$ Min- Max: -130 – 723	Median: 465 $n = 92$ Min- Max: 227 – 1204
Alle Messwerte 2023-2025	Median: 26.7 $n = 1049$ Min- Max: -326 – 1176	Median: 343 $n = 1358$ Min- Max: -271 – 1596

Obleich die Gewässerfläche des Management-Gewässers in der Zeit von September bis November ihre minimale Ausdehnung aufwies, waren die Gesamt-Emissionen des Gewässers (Boden- und Wasser-Habitate) in dieser Zeit ebenfalls am geringsten (Median:  $18.4 \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$ ,  $n = 250$ , Min: -129, Max: 1030) und stehen den höchsten Emissionen (Median:  $475.7 \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$ ,  $n = 240$ , Min: 73.8, Max: 1203) am Referenz-Gewässer gegenüber.



Abbildung 2:  $\text{CO}_2$ -Flux ( $\text{mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$ ) aus dem wiedervernässten Management- (links) und dem Referenz-Gewässer (rechts). Vergleich der Emissionen aus Gewässeroberfläche (Wasser, blau) und trockenen Bereichen (Boden, rot) im Jahresverlauf (2023-2025).

### Einfluss der Habitatstruktur auf die $\text{CO}_2$ -Emissionen

Über die Projektlaufzeit hinweg wurden  $\text{CO}_2$ -Fluxe im Bereich von minimal  $-326 \text{ mmol m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$  (Juli 2024, Habitat: Wasser, submerser und schwimmende Makrophyten und Phytoplankton) bis maximal  $1596 \text{ mmol m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$  (Juni 2023, Habitat: Boden, aufragende Vegetation und Streu) gemessen. Stärkste  $\text{CO}_2$ -Emissionen mit der breitesten Streuung der Messwerte zeigten Habitate mit aufragender Vegetation und Streu (Median:  $365 \text{ mmol m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$ ,  $n = 1327$ ). Über barem Grund emittierte deutlich weniger  $\text{CO}_2$  (Median:  $110 \text{ mmol m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$ ,  $n = 170$ ) und über submersen und schwimmenden Makrophyten und Phytoplankton in der Wassersäule wurde am wenigsten  $\text{CO}_2$  emittiert (Median:  $8.9 \text{ mmol m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$ ,  $n = 724$ ). Dieser Habitattyp nahm vor allem in den Sommermonaten häufig eine Senkenfunktion für  $\text{CO}_2$  ein (Abb. 3).

Im temporär trockengefallenen Uferbereich wurden vergleichbare  $\text{CO}_2$ -Emissionen gemessen wie in anderen, permanent trockenen Bodenbereichen. In Bezug auf  $\text{CO}_2$  wurden hier keine Hotspots verstärkter Emissionen identifiziert.

## KLIMAWIRKUNG

Vergleichende Messungen der CO<sub>2</sub>-Fluxe zwischen trockengefallenem und wiedervernässtem Gewässer zeigten eine positive Klimabilanz des renaturierten Gewässers mit deutlich verringerten CO<sub>2</sub>-Emissionen. Welche Rolle der bei der Entschlammung entnommene organische Aushub selbst für Treibhausgasemissionen hat, ist nach aktuellem Stand der Forschung noch nicht ausreichend belegt. Das langfristige Bestehen renaturierter Gewässer ist für eine nachhaltige positive Klimawirkung entscheidend. Bei der Wiedervernässung von Agrargewässern geht keine landwirtschaftliche Fläche verloren – Ökosystemleistungen, wie zum Beispiel der Ausgleich von Lebensraumverlusten durch Austrocknung, hingegen, werden zusätzlich gefördert.

Für Wasser-Habitate zeigte sich die Tendenz, dass der Wasserrandbereich und Areale mit einer kurzen Hydroperiode und einer Wassersäule < 40 cm mehr CO<sub>2</sub> emittieren als Wasser-Habitate mit permanenter Wassersäule > 40 cm. Punktuell wurde auch für Boden-Habitate mit frischem Gras und hoher Bodenfeuchte eine CO<sub>2</sub>-Aufnahme beobachtet (beide Standorte April 2024/25). Bodenhabitate, die als CO<sub>2</sub>-Senke dienen, blieben aber die Ausnahme (Abb. 2 und 3).

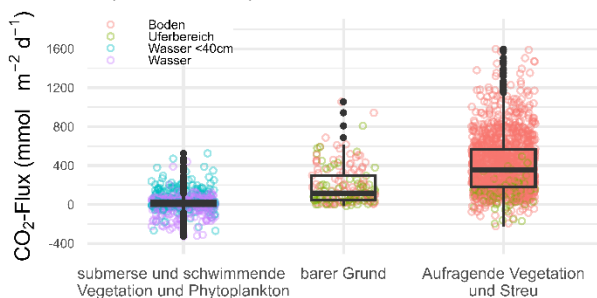


Abbildung 3: CO<sub>2</sub>-Flux in Abhängigkeit verschiedener Habitattypen.

## SCHLUSSFOLGERUNGEN

Diese Studie zeigt über den Untersuchungszeitraum hinweg einen positiven Effekt der Wiedervernässungsmaßnahme auf CO<sub>2</sub>-Emissionen des renaturierten Gewässers – trotz, aber nicht unbeeinflusst von sich verändernden biogeochemischen und hydrologischen Bedingungen. Nachdem das Referenz-Gewässer vor 2023 über mehrere Jahre eine permanente Wasseroberfläche aufwies, fiel es zu Beginn der Messungen trocken. Daher kann im Rahmen dieses Projekts nicht beurteilt werden, ob die Entfernung des organikreichen Sediments im Management-Gewässer – neben dem Effekt der Wiedervernässung infolge der Grundwasseranbindung – einen zusätzlichen Einfluss auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen ausübte, da im Referenz-Gewässer kein vergleichbarer Wasserkörper vorhanden war.

Nicht Gegenstand dieses Projekts war die zeitgleiche Betrachtung anderer Treibhausgase, wie z. B. Methan, welche im Rahmen zukünftiger Untersuchungen für eine Bilanzierung der Gesamt-Treibhausgas-Emissionen (CO<sub>2</sub>-Äq) berücksichtigt werden sollte.

## AUSGEWÄHLTE VERÖFFENTLICHUNGEN

- CO<sub>2</sub>-Emissionen aus einem wiedervernässten Kleingewässer in der Agrarlandschaft. 39. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Limnologie. Poster, Sept. 2024, Dresden
- Comparative study of CO<sub>2</sub> fluxes in a restored and a temporary pond with a short hydroperiod. INTECOL Wetlands conference & 20<sup>th</sup> Annual Meeting of SWS Europe. Poster, Juli 2025, Tartu, Estland

### Weitere Informationen:

<https://wissen.julius-kuehn.de/klimaschutz/projekte/reduktion-thg-emissionen/waks>

## Handlungsempfehlungen für Politik und Praxis

Wiedervernässung durch Entschlammung ist eine technisch leicht umzusetzende Maßnahme, die den landwirtschaftlichen Betrieb nicht beeinflusst und über der entstandenen Gewässerfläche zu signifikant verringerten CO<sub>2</sub>-Emissionen führt. Der nachhaltige Erfolg der Maßnahme und somit die Klimawirkung hängt stark vom Fortbestehen des Gewässers ab. Richtlinien zu landwirtschaftlicher Düngung und Maßnahmen zur Stabilisierung des Landschaftswasserhaushalts spielen hier eine entscheidende Rolle. So fördern hohe Nährstoffeinträge die fortschreitende Verlandung kleiner Gewässer durch Makrophytenwachstum. Die Länge der Hydroperiode beeinflusst die Klimawirkung und kann durch Maßnahmen zum Rückhalt von Wasser in der Landschaft positiv beeinflusst werden. Auch die Notwendigkeit von Gewässer-Management wie z. B. die Entnahme von Vegetation ist für individuelle Standorte zu prüfen.

Bei dieser Renaturierungsmaßnahme wurde das organische Sediment auf einem nahegelegenen Acker ausgebracht. Obgleich dieses Vorgehen übliche Praxis (z. B. auch in der Moor-Wiedervernässung) ist, bleibt die Frage unbeantwortet, welchen Einfluss potenzielle Treibhausgas-Emissionen vom Aushub auf die Klimawirkung der Wiedervernässungsmaßnahme hat. Somit bedarf es hier weiterer Untersuchungen, um die Wiedervernässungsmaßnahme hinsichtlich ihres Klimaschutzpotenzials ganzheitlich beurteilen zu können.

In Kooperation mit:



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

### Fernerkundung für eine Verbesserung der Klimaberichterstattung

**Stefan Erasmí, Marcel Schwieder, Alexander Gocht, Javier Muro, Lukas Blickensdörfer, Tom Brög, Felix Lobert, Gideon Tetteh, Roland Fuß und Axel Don**

#### ZIELSETZUNG

Die Novellierung der EU-LULUCF-Verordnung ([EU-VO 2023/839](#), Anhang V) sieht vor, dass die Mitgliedsstaaten ab 2028 für die Vorlage der Treibhausgasinventare auf räumlich explizite Daten und Methoden für die Schätzungen der Emissionen und die Modellierung der Kohlenstoffspeicher zurückgreifen. Die Verfügbarkeit von bundesweiten und hochauflösenden Landnutzungsdaten und insbesondere „Aktivitätsdaten“ d. h., Informationen über Landnutzungsentscheidungen und Bearbeitungspraktiken von Landwirten, die potenziell zur Kohlenstoffbindung oder -freisetzung bzw. zum Humusaufbau oder -abbau auf landwirtschaftlich genutzten Böden beitragen, ist aber begrenzt. Im Projekt KlimaFern wurden Methoden entwickelt, mit denen die landwirtschaftliche Flächennutzung aus Satellitendaten regelmäßig, bundesweit flächendeckend und zeitnah erfasst werden kann.

Es wurden Satellitendaten und Methoden der künstlichen Intelligenz genutzt, um flächendeckend für die Agrarlandschaft Aktivitätsdaten zu erfassen. Der Schwerpunkt lag hierbei auf der Grünland- und Ackerlandnutzung sowie der Entwicklung von Indikatoren, die einen Humusaufbau oder -abbau abbilden. Darüber hinaus wurden Verfahren zur direkten Kohlenstoffschätzung von Ackerböden aus Satellitendaten entwickelt.

#### METHODIK

##### Satelliten-Datenprozessierung

Für die Erstellung bundesweiter, flächendeckender Landnutzungsdaten müssen große Mengen an Satellitenbilddaten effizient und standardisiert vorverarbeitet werden. Im Projekt wurde hierfür eine Cloud-basierte Prozessierungsumgebung etabliert (FORCE - Framework for Operational Radiometric Correction for Environmental monitoring). FORCE ist ein sehr leistungsfähiges, freies Open-Source-System zur automatisierten Prozessierung von großen Mengen von Satellitenbilddaten – insbesondere für Sentinel-2, Landsat und andere multispektrale Sensoren. Als Ausgabe liegen sogenannte „analysefertigen Daten“ vor, die für die themenbezogenen Entwicklungen und Anwendungen in KlimaFern als Grundlage dienen.

Die Daten der Landsat-Satelliten ermöglichen Berechnungen bis in das Referenzjahr der LULUCF-Verordnung (1990) in einer mittleren räumlichen Auflösung (30 m). Sentinel-2 Daten liegen erst seit 2016 vor, liefern aber eine höhere Auflösung (10 m) sowie eine deutlich höhere zeitliche Datendichte, die eine verbesserte Erfassung von saisonalen Parametern und Landnutzungsdynamiken ermöglicht. Zusätzlich wurden monatliche Komposite der räumlich sehr hoch auflösenden PlanetScope Satelliten (3 m) in die Arbeitsabläufe integriert.

#### HIGHLIGHTS

- Erstmalige Verfügbarkeit jährlicher, bundesweit flächendeckender Karten zur landwirtschaftlichen Nutzung seit 1990
- Hochauflösende, einheitliche Erfassung und Quantifizierung des Heckenvorkommens in der Agrarlandschaft für Deutschland
- Integration der Projektergebnisse in die Berechnung der Emissionsinventare (LULUCF) für eine verbesserte Berücksichtigung der landwirtschaftlichen Nutzung
- Erstmalige flächendeckende Berechnung von Humus-Trends mit Fernerkundungsdaten
- Veröffentlichung der Ergebnisse in hochrangigen internationalen Fachzeitschriften

#### Erhalt von Dauergrünland

Böden unter Dauergrünland speichern mehr Kohlenstoff im Vergleich zu Böden unter Ackerland. Die Menge an Bodenkohlenstoff ist unter anderem abhängig vom Grünlandalter, also dem Zeitraum seit initialer Grünlandnutzung auf der Fläche. Ziel war hier die Entwicklung eines Verfahrens zur Schätzung des Grünlandalters aus langen Zeitreihen von Satellitendaten ab 1990. Die Datengrundlage bestand aus Zeitreihen von Offenbodenhäufigkeiten, die für jede einzelne Fläche aus allen für diese Fläche vorliegenden, wolkenfreien Satellitenbildern abgeleitet wurden. Da die Offenbodenhäufigkeit im Ackerland deutlich höher ist als im Grünland (vor allem durch regelmäßige Bodenbearbeitung), lassen sich Phasen mit unterschiedlicher Flächennutzung (Acker-/ Grünland) ableiten und hieraus das Etablierungsjahr von Grünlandflächen bestimmen. Das Modell zur Detektion von Offenboden wurde anhand von Daten aus dem Land Use/Cover Area Frame Survey (LUCAS) trainiert und validiert. Aus den zeitlichen Mustern der Offenbodenhäufigkeit wurde über einen regelbasierten Ansatz das Grünlandalter bestimmt. Der Regelsatz wurde auf alle Flächen mit Grünlandnutzung in Deutschland angewandt und schätzt dadurch für jede Fläche das Jahr der initialen Grünlandnutzung, bzw. das Grünlandalter, seit 1990. Hierfür wird als Ausgangspunkt die heutige räumliche Verteilung von Grünland zugrunde gelegt.

#### Humuserhalt und -aufbau in Ackerland

Der Kohlenstoffaufbau und -abbau auf mineralischen Böden im Ackerland wird maßgeblich durch die Art der landwirtschaftlichen Nutzung (z. B. Fruchtarten, Hecken, Zwischenfrüchte) und deren Produktivität, d. h., der generellen Umsetzung von Strahlungsenergie in Pflanzenwachstum über das gesamte Anbaujahr, beeinflusst. Eine räumlich hochauflösende und bundesweit konsistente Erfassung dieser Einflussgrößen in der Agrarlandschaft fehlte bisher.

**Landnutzung:** Bisherige Modelle zur Kartierung der Hauptfruchtarten sind auf jährliche Referenzdaten angewiesen und können daher nur zeitlich begrenzt zurückgerechnet werden. In KlimaFern wurden die Verfahren zur Kartierung der bundesweiten, landwirtschaftlichen Flächennutzung weiterentwickelt, um Informationen bis zum Referenzjahr der Klimaberichterstattung (1990) zu liefern. In Kooperation mit der Universität Greifswald wurde ein Deep-Learning-Ansatz getestet, der in der Lage ist, räumliche und zeitliche Muster in den oft lückenhaften Satellitenbilddaten und nur begrenzt verfügbaren Referenzdaten zu erkennen, und auf unbekannte Jahre anzuwenden (Pham et al. 2024).

**Bodenbedeckung:** Der Anteil und Zustand der Bodenbedeckung von Ackerland über das Anbaujahr ist ein Zeiger für die Bruttonährstoffproduktion der Vegetation. In Kooperation mit dem Projekt klimMAGS des Thünen-Instituts wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem die Bodenbedeckung als dichte Zeitreihe über das Jahr abgebildet werden kann. Dieses basiert auf einer Analyse der spektralen Eigenschaften der Hauptfraktionen (Vegetation, Ernterückstände, Boden) für jedes Pixel zu jedem Aufnahmezeitpunkt einer Landsat- oder Sentinel-2-Aufnahme (Lobert et al. 2025a). Die Informationen einer Einzelaufnahme für die drei Fraktionen wurden zu Zeitreihen der Bodenbedeckung interpoliert und über regelbasierte Verfahren wurden Indikatoren der Bodenbedeckung für verschiedene Anbauphasen abgeleitet.

**Hecken:** Hecken sind durch die hohe Kohlenstoffbindung eine wichtige Säule bei der Erreichung der Klimaschutzziele im LULUCF-Sektor. Sie erfüllen darüber hinaus weitere wichtige Leistungen wie Erosionsschutz oder Biodiversitätsförderung (siehe Projekt CatchHedge für Details). Eine konsistente flächendeckende Erhebung des Heckenvorkommens fehlt aber. In KlimaFern wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem Hecken in der Agrarlandschaft flächendeckend erfasst werden können. Hierzu wurden räumlich sehr hoch auflösende Satellitendaten von PlanetScope (3 m) genutzt, die für ganz Deutschland als monatliche Komposite vorliegen.

Die Auswertung basiert auf einem Deep Learning Modell, das in der Lage ist, aufgrund von bekannten (gelabelten) Bildbereichen die typischen räumlichen und zeitlichen Muster der spektralen Reflexion von Hecken in den Satellitenbilddaten zu erlernen und auf unbekannte Regionen (die gesamte Agrarlandschaft) zu übertragen. Für die detektierten Hecken erfolgte eine strukturelle Charakterisierung auf Basis eines aus digitalen Höhendaten abgeleiteten Bestands-Höhenmodells.

#### Bodenkohlenstoff in Ackerland

Zustand und Veränderung des Bodenkohlenstoffs sind wichtige Kenngrößen für die Bewertung der Klimaschutzfunktion von Böden und für die Bodengesundheit. Die Durchführung von großräumigen und wiederkehrenden in situ Erhebungen wie der Bodenzustandserhebung Landwirtschaft (BZE-LW) liefert wichtige Erkenntnisse über die Bodenfunktionen, ist jedoch zeit- und kostenintensiv.

Ergänzend zur Beprobung können Satellitendaten verwendet werden, um großflächige Bodenkarten zu erstellen. In KlimaFern wurden vegetationsfreie Satellitenbilder über lange Zeiträume ausgewertet, um räumliche und zeitliche Muster der Bodenreflektanz zu erkennen und in Relation zu Bodenparametern zu setzen. Machine Learning Modelle wurden entwickelt, um hochauflösende Karten über den Zustand von Bodeneigenschaften (Kohlenstoffvorräte, Bodentextur etc.) in Deutschland zu erstellen, und um Informationen über die zeitliche Veränderung der Bodeneigenschaften abzuleiten. Für die Kalibrierung und Validierung der statischen Modelle wurden die Daten der BZE-LW verwendet. Für die Analyse der langfristigen Kohlenstoffdynamiken lagen Daten zu Wiederholungsmessungen für den Zeitraum von 1986 bis 2022 für 100 Bodendauerbeobachtungsflächen der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft vor.

## ERGEBNISSE

### Erhalt von Dauergrünland

Die Arbeiten zeigen, dass eine verlässliche Abschätzung des Alters von Dauergrünland basierend auf Satellitenbild-Zeitreihen bis in die 1990er Jahre möglich ist. Eine Unterscheidung zwischen Dauergrünland, das schon vor 1990 bewirtschaftet wurde, und Flächen, die nach 1990 neu angelegt wurden, ist mit einer Genauigkeit von 99 % möglich. Wobei neu (ab 1990) angelegte Flächen mit einer Genauigkeit zwischen 75 % und 83 % und einem durchschnittlichen Fehler von 1,3 Jahren erkannt werden. Die bundesweiten Karten zeigen, dass 78 % der heutigen Dauergrünlandflächen bereits vor 1990 als Grünland bewirtschaftet wurden (Abb. 1).

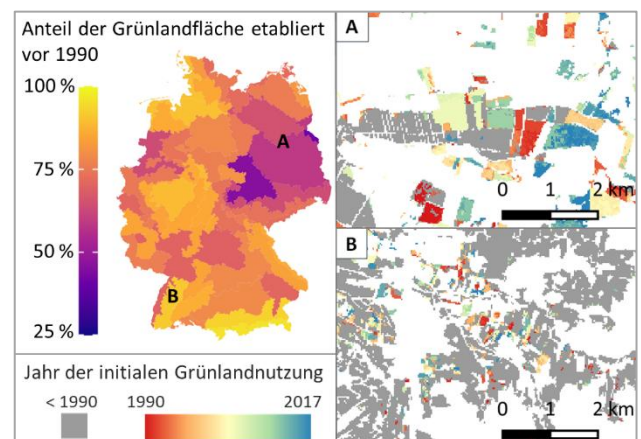


Abbildung 1: Vorhersage des Grünlandalters. Auf Boden-Klima-Räume aggregierter Anteil der Grünlandnutzung, die bereits vor 1990 etabliert wurde (links). Detailsichten dargestellt als Jahr der initialen Grünlandnutzung (rechts).

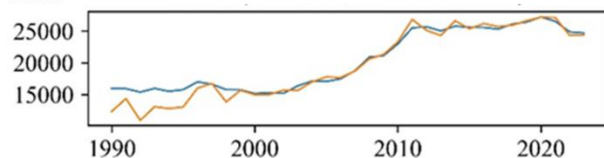
Die Daten können als Input zur Bodenkohlenstoffmodellierung unter Dauergrünland die Klimaberichterstattung verbessern. Zudem bietet der entwickelte Ansatz Anknüpfungspunkte, um auch die Häufigkeit und Zeitpunkte von Grünlandumbruch als Teil des Grünlandmanagements aus Satellitenbildzeitreihen mittels Offenbodenkartierungen zu schätzen, einen weiteren potenziellen Inputparameter für die Bodenkohlenstoffmodellierung.



## Humuserhalt und -aufbau in Ackerland

**Landnutzung:** Als Ergebnis liegen jährliche, deutschlandweite Karten der landwirtschaftlichen Flächennutzung von 1990-2023 vor. Das auf Deep Learning basierende Verfahren ermöglichte erstmals die verlässliche und konsistente Erstellung von Karten für Jahre ohne flächenscharfe Referenzdaten. Der Vergleich der Karten auf aggregierter Ebene (Kreise, Bundesländer) mit Daten der amtlichen Statistik (Destatis) zeigt eine hohe Übereinstimmung sowohl der absoluten Zahlen (Anbaufläche) als auch der Trends für den betrachteten Zeitraum (Abb. 2, [Tetteh et al. 2025](#)). Auch, wenn die geringe Anzahl an Satellitendaten in den frühen 1990er Jahren und die geringe Anzahl an Referenzdaten für weniger dominante Feldfrüchte die Unsicherheiten in den erzeugten Daten erhöhen, erlauben die Ergebnisse dennoch erstmals eine räumlich explizite hochauflösende Bewertung und Parametrisierung der Anbauvielfalt und hierauf basierend die Abbildung von raum-zeitlichen Mustern in der Anbauabfolge. Aktuell erfolgt eine Evaluierung und Optimierung des Produkts für die Integration in die Kohlenstoffmodellierung und die Erstellung der Emissionsinventare für die Klimaberichterstattung.

### Mais



### Wintergetreide

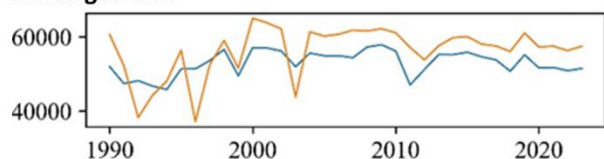


Abbildung 2: Die im Projekt kartierten Flächen in km² (orange) von Mais und Wintergetreide im Vergleich zu offiziellen Statistiken von Destatis (blau) von 1990 bis 2023.

**Bodenbedeckung:** Die Ergebnisse zeigen, dass eine Abschätzung der drei Hauptfraktionen (Vegetation, Ernterückstände, Boden) über das Anbaujahr mit hohen Genauigkeiten zwischen 60 und 80 % möglich ist ([Lobert et al. 2025a](#)). Die kalibrierten Modelle wurden anschließend verwendet, um bundesweite und hochauflösende Informationen über den Verlauf der Bodenbedeckung in Deutschland zu erstellen und hieraus exemplarisch Indikatoren der Winterbegrünung abzuleiten. Hierzu wurde für jedes Feld der dominante Bedeckungsgrad nach der Ernte der Hauptfrüchte modelliert, um Informationen über Zeitpunkt und Dauer der Winterbegrünung und weiterer Bedeckungsformen (Brachen, organische Auflagen etc.) abzuleiten ([Lobert et al. 2025b](#)). Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass der prozentuale Anteil der Winterbegrünung auf Ackerflächen in Deutschland seit 2017 zugenommen hat (17 % zu 21 %), während sich der Anteil der offenen Brachen (Schwarzbrachen) im selben Zeitraum deutlich reduziert hat (20 % zu 12 %). Die Karten zur Bodenbedeckung liegen für die Jahre 2017 bis 2023 vor und liefern hochauflösende Daten zur landwirtschaftlichen Flächennutzung, die als Modellpara-

meter für die kleinräumige Modellierung der Kohlenstoffbindung im Boden Verwendung finden und darüber hinaus die Bewertung des Bodenzustands für weitere Funktionen (z. B. Bodenerosion, biologische Vielfalt) unterstützen.

**Hecken:** Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass das entwickelte Deep Learning Modell sehr geeignet ist bundesweit, flächendeckend Hecken in der Agrarlandschaft vorherzusagen ([Muro et al. 2025](#)). Ein Vergleich der Ergebnisse auf Basis der PlanetScope-Daten mit einer Ableitung aus noch höher auflösenden Satellitendaten (1,5 m, Spot/Pleiades) hat gezeigt, dass der Nachteil einer etwas niedrigeren Auflösung (3 m), die ungefähr der Mindestbreite von Hecken entspricht, durch die wiederholte Erfassung im zweimonatlichen Rhythmus (April bis Oktober) kompensiert werden kann. Für die Agrarlandschaft in Deutschland konnte somit im Jahr 2022 ein Heckenbestand von 4.081 km² geschätzt werden, was etwa 2,3 % der gesamten landwirtschaftlich genutzten Fläche entspricht. Die Validierung der kartierten Heckenlängen innerhalb der Testgebiete zeigt, dass die Modellgüte mit über 95 % als sehr hoch einzuschätzen ist. Hieraus ergab sich eine Gesamtlänge von etwa 372.230 km und rund 2,1 km Hecke pro km² Agrarfläche, die jedoch ungleich verteilt ist und sich zu einem großen Anteil auf Gebiete im Norden und Nordwesten Deutschlands konzentriert (Abb. 3).

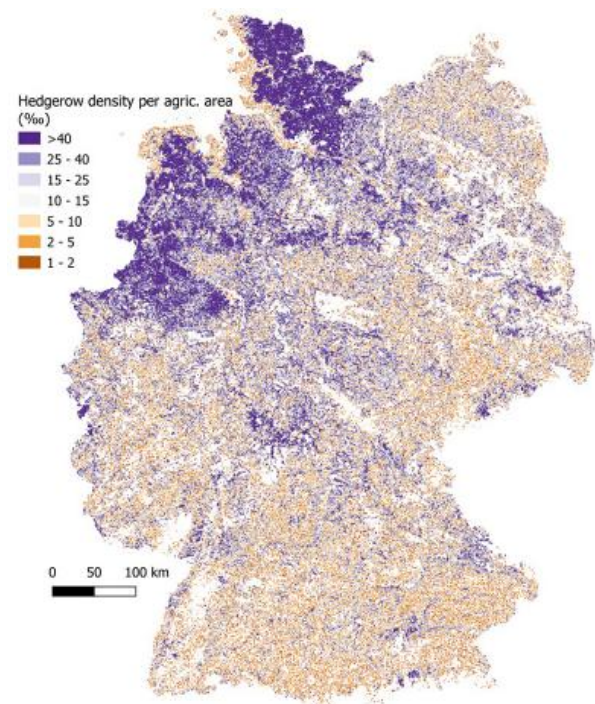


Abbildung 3: Anteil (in %) von Hecken an der landwirtschaftlichen Fläche in Deutschland (aggregiert auf 1 km² Hexagone).

## Bodenkohlenstoff in Ackerland

Die Ergebnisse zeigen, dass die Auswertung der Bodenreflektanz bzw. Bodenfarbe aus Kompositen vieler verfügbarer Satellitendaten geeignet ist, um großflächige Informationen über den Zustand und die Veränderung des Bodenkohlenstoffs in landwirtschaftlich genutzten Flächen abzuleiten (Abb. 4). Für die statische Modellierung der Kohlenstoffvorräte auf Grundlage von Sentinel-2-Bildern und der BZE-LW wurde eine Modellgenauigkeit von 82 %

## KLIMAWIRKUNG

- Die Ergebnisse und Produkte aus KlimaFern tragen dazu bei, die Berechnung der Emissionsinventare für den LULUCF-Sektor zu verbessern.
- Die Verfahren zur flächendeckenden Schätzung von Bodenparametern ermöglichen eine unabhängige Evaluierung der (langfristigen) Wirksamkeit von Klimaschutzmaßnahmen.
- Die in KlimaFern erstellten Karten und Produkte sind öffentlich über eine [Zenodo-Community](#) und damit auch für eine Nachnutzung im Rahmen weiterer Umwelt- und Klimaschutzprojekte verfügbar.

erreicht, was in Bezug auf die kleinräumige Variabilität des Bodens als sehr hoch einzuschätzen ist (Broeg et al. 2026). Die Kartierung des Tongehalts als wichtiger erklärender Parameter für den Bodenkohlenstoff war ebenso mit hoher Genauigkeit (knapp 90 %) möglich. Landwirtschaftlich genutzte Flächen mit sehr großen Kohlenstoffvorräten befinden sich überwiegend in nordwestlichen Regionen, in denen organischen Böden mit hohen Sandgehalten dominieren (Abb. 4). Im Vergleich zeigt sich eine hohe Diversität der Bodentextur in Süddeutschland, mit teils sehr hohen Tongehalten über 50 %. Die Projektergebnisse zeigen, dass sich diese Diversität der Bodenlandschaften teils deutlich auf die Zusammenhänge zwischen Bodenfarbe und -eigenschaften auswirkt und in der Modellierung berücksichtigt werden muss (Broeg et al. 2024a).

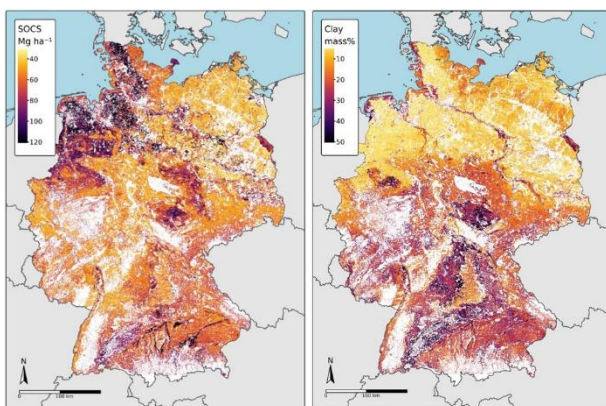


Abbildung 4: Vorhersage der Bodenkohlenstoffvorräte (links) sowie der Tongehalte (rechts) in Deutschland, auf Basis von Sentinel-2 Daten und den Proben der Bodenzustandserhebung Landwirtschaft.

In KlimaFern wurden erstmals flächendeckende Informationen über Kohlenstoffänderungen in Ackerböden abgeleitet und anhand langjähriger Messdaten validiert (Broeg et al. 2024b). Die Ergebnisse liefern signifikante Informationen über Kohlenstofftrends. Die Karten können

somit die flächendeckende Bilanzierung des Bodenkohlenstoffs unterstützen und helfen, die Wirksamkeit von Klimaschutzmaßnahmen wie Carbon Farming unabhängig zu evaluieren.

## SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Ergebnisse von KlimaFern zeigen, dass Methoden der Fernerkundung genutzt werden können, um bundesweit einheitliche und hochauflösende Karten über die landwirtschaftliche Flächennutzung zu erstellen. Dies umfasst sowohl die Ableitung flächendeckender Aktivitätsdaten (Hauptfruchtarten, Hecken, Bodenbedeckung etc.) als auch Karten zur direkten Kohlenstoffschätzung in Ackerböden. Die in KlimaFern entwickelten Methoden und Produkte tragen dazu bei, die Klimaberichterstattung für den LULUCF-Sektor zu verbessern und die Wirksamkeit von Klimaschutz-Maßnahmen in der Landwirtschaft unabhängig zu überprüfen.

## AUSGEWÄHLTE VERÖFFENTLICHUNGEN

- Broeg T, Don A, ..., Erasmi S (2024a): Using local ensemble models and Landsat bare soil composites for large-scale soil organic carbon maps in cropland. *Geoderma* 444, 116850. doi. 10.1016/j.geoderma.2024.116850
- Broeg T, Don A, ..., Erasmi S (2024b): Spatiotemporal Monitoring of Cropland Soil Organic Carbon Changes From Space. *Global Change Biology* 30, e17608. doi. 10.1111/gcb.17608
- Lobert F, Schwieder S, ..., Erasmi S (2025): Unveiling year-round cropland cover by soil-specific spectral unmixing of Landsat and Sentinel-2 time series. *Remote Sensing of Environment* 318, 114594. doi. 10.1016/j.rse.2024.114594
- Muro J, Blickensdörfer L, ..., Erasmi S (2025): Hedgerow mapping with high resolution satellite imagery to support policy initiatives at national level. *Remote Sensing of Environment* 328, 114870. doi. 10.1016/j.rse.2025.114870
- Pham VD, Tetteh G, ..., van der Linden S (2024): Temporally transferable crop mapping with temporal encoding and deep learning augmentations. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 129, 103867. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.103867>

## HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN FÜR POLITIK UND PRAXIS

Satellitendaten ermöglichen eine flächendeckende Erfassung der Landnutzung und der Abschätzung des Zustands von Ökosystemen und deren Veränderung. Sie stellen eine wichtige Säule für verschiedene Monitoring- und Evaluierungsvorhaben sowie Berichtspflichten auf nationaler Ebene und darüber hinaus dar. Der nachhaltige Einsatz satellitenbasierter Fernerkundung und moderner KI-Verfahren erfordert die langfristige und kontinuierliche Verfügbarkeit von Daten (siehe Copernicus-Programm der EU) und die Bereitstellung und Etablierung dauerhafter organisatorischer und IT-Strukturen. Dies ist von zentraler Bedeutung sowohl für eine anwendungsspezifische Inwertsetzung als auch für eine Ressort-übergreifende Nutzung von Ressourcen und Synergien im Bereich Erdbeobachtung der Landoberfläche.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Landwirtschaft, Ernährung  
und Heimat

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Wie genau und plausibel sind Machine Learning-Produkte zur Abschätzung des Oberboden-Kohlenstoffgehaltes landwirtschaftlicher Böden?

Markus Möller, Marvin Dierks und Younes Garosi

### ZIELSETZUNG

Der klimabedingte Anstieg der Lufttemperatur führt zu einem signifikanten Verlust von organischem Kohlenstoff (SOC = Soil Organic Carbon) insbesondere in den oberen Bodenschichten. Digital Soil Mapping (DSM) ermöglicht ein effektives, flächendeckendes und wiederholbares Monitoring der SOC-Gehalte und deren Veränderungen im Kontext von Klimawandel und Managementmaßnahmen. Damit haben DSM-basierte SOC-Produkte das Potenzial, als Schlüsselinstrument für Transparenz, Nachweis und Optimierung von Emissionsminderungsmaßnahmen sowie für die Ableitung kritischer Trends im Boden-Kohlenstoffhaushalt zu fungieren. Aktuelle Herausforderungen bestehen in den Bereichen Prognosegüte und Unsicherheitsabschätzung sowie der Kommunikation der Ergebnisse. Vor diesem Hintergrund sowie basierend auf Vorarbeiten zur Optimierung und Parametrisierung von DSM-Prozessketten (Möller et al., 2022 ; Zepp et al., 2023) adressiert das KoBoS-Projektvorhaben folgende Komponenten der DSM-Prozesskette (Abb. 1):

- Verbesserung der Prognosegüte durch **Optimierung des Sampling-Designs**, um eine verbesserte Modelgüte und räumliche Detailtreue zu ermöglichen.
- Entwicklung von Verfahren zur Abschätzung und transparenten **Kommunikation von Datenqualität und Unsicherheiten**, um die Belastbarkeit der DSM-Produkte nachvollziehbar darzustellen.

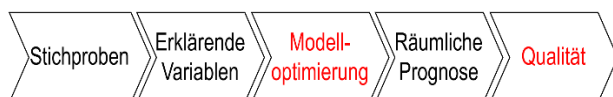


Abbildung 1: Kernkomponenten einer Digital Soil Mapping-Prozesskette. © M. Möller, JKI

### METHODIK

Am Beispiel des Freistaates Bayern werden zunächst die Auswirkungen von **Sampling-Design**-Varianten auf die Modellierungsergebnisse analysiert. Die Variationen beziehen sich auf Algorithmen zur Stichprobenauswahl sowie das Verhältnis von Kalibrierungs- und Validierungsdaten (Cal/Val). Als erklärende Variablen dienten multi-hierarchische Reliefattribute und multitemporale Bodenreflexionskomposite (SRC = Soil Reflectance Composite), die aus Landsat-Satellitenbildaufnahmen von 1984 bis 2014 abgeleitet worden sind. Stichproben von bayrischen Landesbehörden werden zur Kalibrierung und Validierung genutzt (vgl. Möller et al., 2020; Zepp et al., 2023).

Die Ergebnisse sind in eine **Open Source-Prozesskette zur räumlichen SOC-Prognose im Oberboden** überführt worden. Die Methodik kombiniert maschinelles Lernen mit räumlicher Validierung und Unsicherheitsquantifizierung, um Nutzern bei der Bewertung der Modellierungsergebnisse

### HIGHLIGHTS

- Optimiertes Sampling-Design verbessert Prognosegüte
- Modell- und distanzbasierte Unsicherheitsquantifizierung erlaubt die Quantifizierung und Lokalisierung von Unsicherheiten
- Open-Source-Reproduzierbarkeit: Entwickelter R-Code vereint Unsicherheitsanalyse mit vollständiger Dokumentation und Nachvollziehbarkeit für belastbare Machine Learning-Produkte

hinsichtlich ihrer Vertrauenswürdigkeit zu unterstützen. Neben Standardmaßen zur statistischen Charakterisierung der globalen Prognosegüte ( $RMSE$ ,  $R^2$ ) wird die Unsicherheit der Modellierungsprodukte quantifiziert. Während das Maß *Prediction Interval Width (PIW)* die lokale Modellunsicherheit charakterisiert, quantifiziert der *Dissimilarity Index (DI)* die Ähnlichkeit des Prognoseergebnisses im multidimensionalen Merkmalsraum unter Berücksichtigung der Stichprobenentfernung. Als Ergebnis entsteht eine detaillierte Karte des Oberboden-Kohlenstoffgehaltes mit räumlichen Unsicherheitsinformationen.

### ERGEBNISSE

Aus Abbildung 2 geht hervor, dass Auswahl des Sampling-Algorithmus und das Verhältnis von Kalibrierungs- zu Validierungsdaten einen entscheidenden Einfluss auf die Genauigkeit und Robustheit der Modellierungsergebnisse haben. Konkret erreicht die Kombination CLHS mit Cal/Val 80/20 die höchste Prognosegenauigkeit. Daraus folgt, dass die Optimierung des Sampling-Designs Bestandteil einer DSM-Prozesskette sein sollte, da sowohl die Effizienz als auch die Repräsentativität der Stichproben gesteigert und damit die räumliche Unsicherheit der Modellierungsprodukte reduziert werden können.

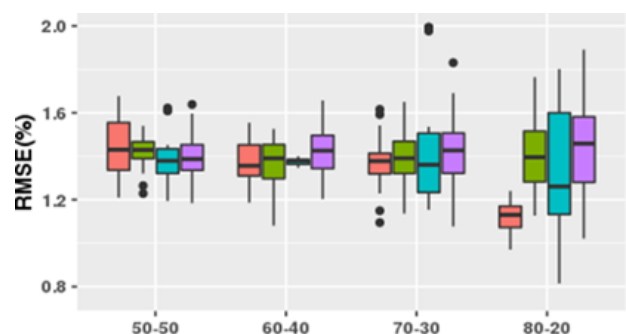


Abbildung 2: Auswirkungen der Cal/Val- (50-50, 60-40, 70-30, 80-20) und Sampling-Varianten Conditioned Latin Hypercube Sampling (CLHS; rot), Feature Space Coverage Sampling (FSCS; grün), Simple Random Sampling (SRS; lila), und K-Fold Nearest Neighbour Distance Matching Cross-Validation (KNNDM; türkis) auf das globale DSM-Qualitätsmaß Root Mean Square Error (RMSE). © Y. Garosi, JKI



## KLIMAWIRKUNG

Die präzise Quantifizierung von Bodenkohlenstoff ist zentral für die Erreichung der Klimaschutzziele bis 2030. Die Projektergebnisse schaffen eine methodische Grundlage für transparentes SOC-Monitoring landwirtschaftlicher Böden. Die entwickelte Open-Source-Prozesskette ermöglicht eine belastbare Quantifizierung und räumliche Lokalisierung von Unsicherheiten. Dies unterstützt die Umsetzung von Humusaufbaumaßnahmen, liefert Datengrundlagen für Carbon-Farming-Programme und ermöglicht verlässliches Monitoring von Klimaschutzmaßnahmen. Die Ergebnisse können so zur Emissionsminderung und zur Stärkung der Kohlenstoffspeicherkapazität landwirtschaftlicher Böden beitragen.

Abbildung 3 a zeigt das optimierte Prognoseergebnis des Oberboden-SOC-Gehaltes für Bayern, das eine Prognosegüte von  $R^2=0,53$  und  $RMSE=1,04$  aufweist. Die Metriken  $PIW$  und  $DI$  veranschaulichen für einen Kartenausschnitt die räumliche Datenunsicherheitsmuster (Abb. 3 b und c). Danach können Gebiete mit hohen Werten in beiden Maßen als besonders unsicher und Gebiete mit niedrigen Werten als am zuverlässigsten eingeschätzt werden.

Niedrige  $PIW$ - und hohe  $DI$ -Werte sind ein Indikator für eine Modellüberanpassung oder unzureichende Modellkomplexität. Hohe  $PIW$ - und niedrige  $DI$ -Werte reflektieren dagegen eine hohe räumliche Variabilität oder komplexe Zusammenhänge, die das Modell nur unzureichend erfassen kann. Das betrifft in Abbildung 3 vor allem Gebiete hoher SOC-Gehalte in Moor- und Niedermoorbereichen.

Der der Prozesskette zugrunde liegende R-Code vereint modell- und distanzbasierte Unsicherheitsquantifizierung, implementiert räumlich angepasste Validierung und gewährleistet die vollständige Nachvollziehbarkeit durch detaillierte Dokumentation, reproduzierbare Einstellungen und der systematischen Qualitätsdokumentation.

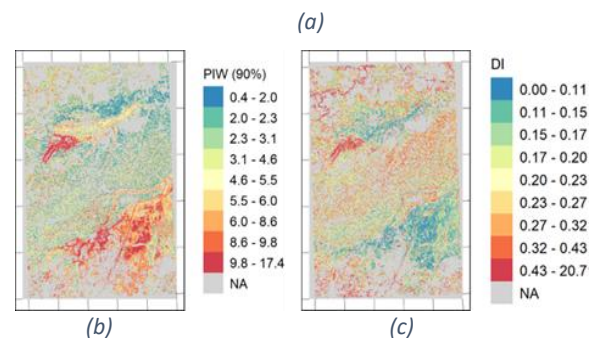
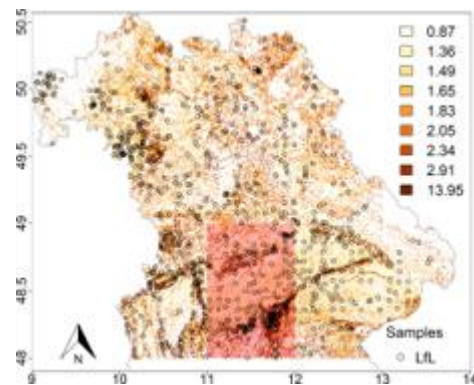


Abbildung 3: Optimiertes Prognoseergebnis des Oberboden-SOC-Gehaltes für den Freistaat Bayern (a) mit  $R^2=0,53$  und  $RMSE=1,04$  sowie die korrespondierenden Unsicherheitsniveaus  $PIW$  (b) und  $DI$  (c) dargestellt anhand eines Kartenausschnitts. © M. Möller & Y. Garosi, JKI

## SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Optimierung des Sampling-Designs und die transparente Unsicherheitsquantifizierung sind essentiell für belastbare DSM-Produkte zur SOC-Kartierung. Die entwickelte Prozesskette kombiniert modellbasierte und distanzbasierte Unsicherheitsmaße, ermöglicht räumlich angepasste Validierung und gewährleistet vollständige Nachvollziehbarkeit. Dies schafft die methodische Grundlage für vertrauenswürdige, flächendeckende SOC-Monitoring-Systeme, die als Schlüsselinstrument für Klimaschutzmaßnahmen, Emissionsnachweis und die Bewertung kritischer Trends im Boden-Kohlenstoffhaushalt dienen können.

## AUSGEWÄHLTE VERÖFFENTLICHUNGEN

Möller M (2025): SOCastR: Soil Organic Carbon Prediction Workflow with Uncertainty Quantification. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17503422>

Möller, M. (2025). Multi-scale Terrain Attributes and Sentinel-2 Bare Soil Composites for Digital Soil Mapping in Bavaria (1.0.0) [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17479135>

## Handlungsempfehlungen für Politik und Praxis

Digital Soil Mapping sollte in nationale Bodenschutzstrategien und Klimamonitoring-Programme integriert werden. Investitionen in standardisierte, bundesweite SOC-Kartierungen mit transparenter Unsicherheitsquantifizierung sind erforderlich, um Carbon-Farming-Maßnahmen evidenzbasiert zu steuern. Open-Source-Ansätze erhöhen die Reproduzierbarkeit und ermöglichen kosteneffiziente Skalierung.

Landwirtschaftliche Beratungsdienste sollten optimierte Sampling-Designs nutzen, um Bodendaten zu erheben. Räumliche Unsicherheitskarten ermöglichen eine zielgerichtete Auswahl von Standorten für Humusaufbaumaßnahmen.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Landwirtschaft, Ernährung  
und Heimat

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages