

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)

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



Max Rubner-Institut (MRI)

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



Thünen-Institut

Bundeforschungsinstitut 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>).

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 \times Umwelt \times 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.

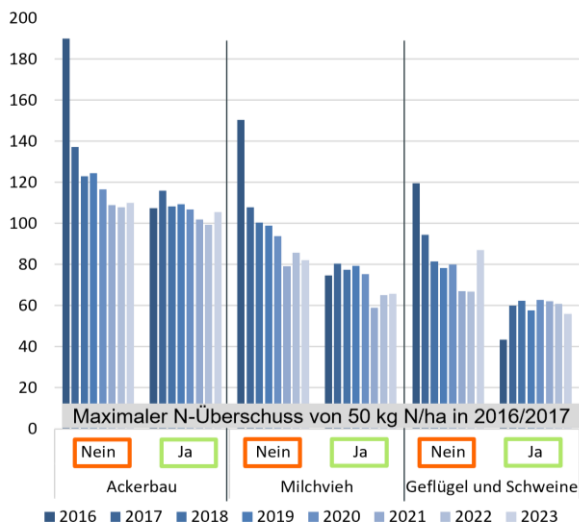


Abbildung 1: Veränderung der N-Düngemengen in unterschiedlichen Betrieben. Durchschnittliche N-Menge in kg/ha für unterschiedliche konventionelle Betriebstypen differenziert nach Einhaltung des maximalen N-Überschusses von 50 kg N/a in 2016/2017

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.

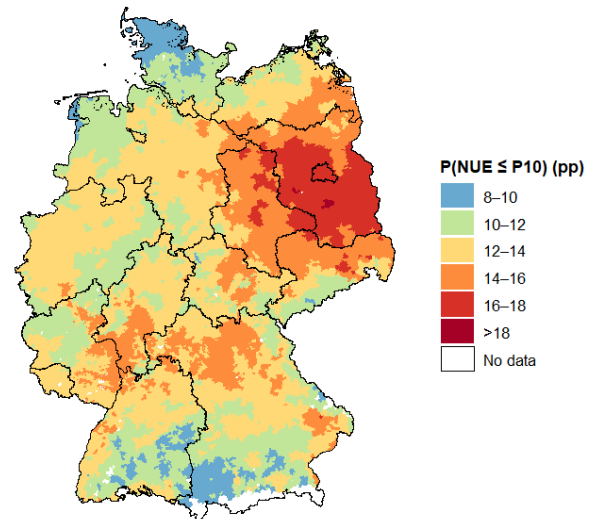


Abbildung 2: Beispiel aus den vorläufigen Ergebnissen: Risiko (%) eines signifikanten Rückgangs der NUE aufgrund der Witterung in 2019 (ohne betriebsindividuelle Effekte)

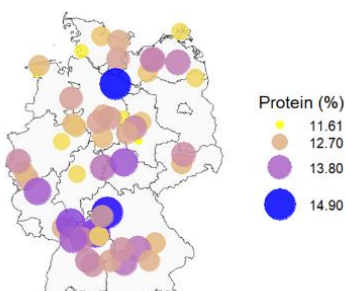
In einem weiteren Schritt ließen sich die Standorte identifizieren, die auf Basis der Witterung in der Vergangenheit eine besonders hohe Wahrscheinlichkeit haben, im Ackerbau signifikante Einbrüche in der NUE aufzuweisen. Im hier gezeigten Beispiel der vorläufigen Ergebnisse (Abb. 2) sind das auf Basis 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

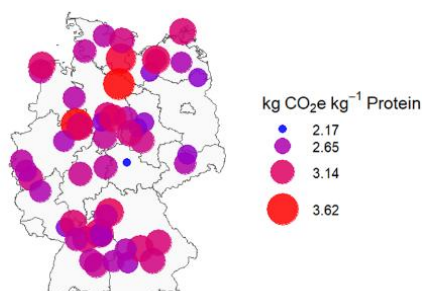
Die Langzeitanalysen zur Entwicklung der NUE mit den Daten des Bundessortenamtes zeigten, dass sich die NUE in den letzten Jahrzehnten durch die Entwicklung und Nutzung verbesserter Sorten signifikant verbessert hat. Trotz einer Reduktion der Stickstoffdüngung in Weizen, Gerste, Roggen, Mais, Raps und 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, %)



CO₂ Fußabdruck je kg Protein



Stickstoffnutzungseffizienz

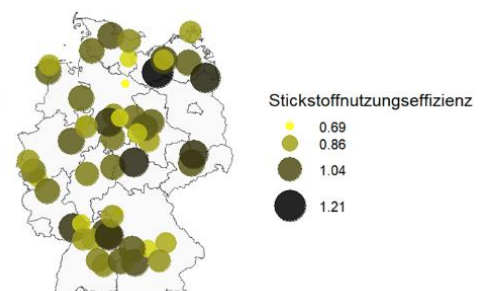


Abbildung 3: Standortspezifische Unterschiede im Proteingehalt, CO₂-Fußabdruck je kg Protein und Stickstoffnutzungseffizienz (NUE) des Proteintrags bei Winterweizen in Deutschland (VCU-Daten 1993–2021).

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 CO₂-Fußabdruck im Ackerbau. Der Züchtungsfortschritt hilft dabei, mit weniger N gleichbleibende Erträge bei verbessertem CO₂-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-Proteinерtrag 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 CO₂-Äq je kg Protein im CO₂-Fußabdruck des Proteinерtrags, und 0,7–1,2 kg N in Korn je kg N verfügbar (gedüngt + Gehalt an verfügbarem mineralisierten N im Boden, N_{min}), d.h., in der NUE des Proteinерtrags.

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

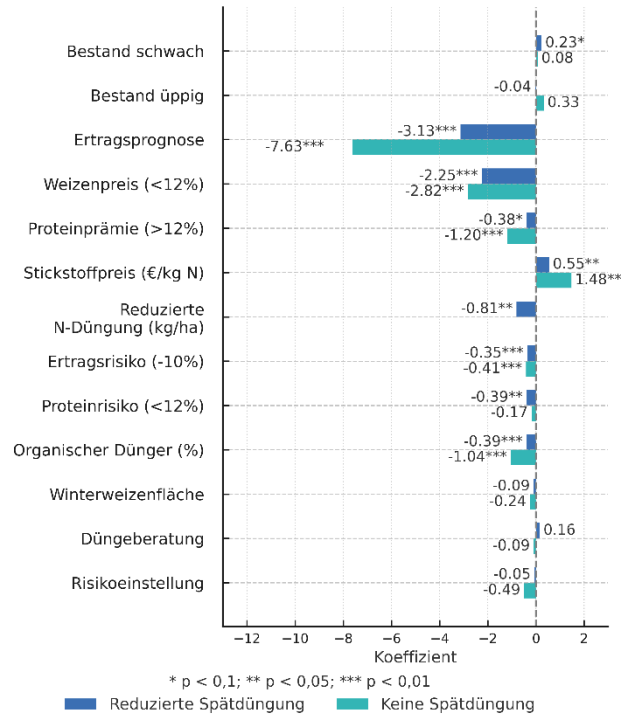


Abbildung 4: Ergebnisse des Discrete Choice Experiments (N=149)

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

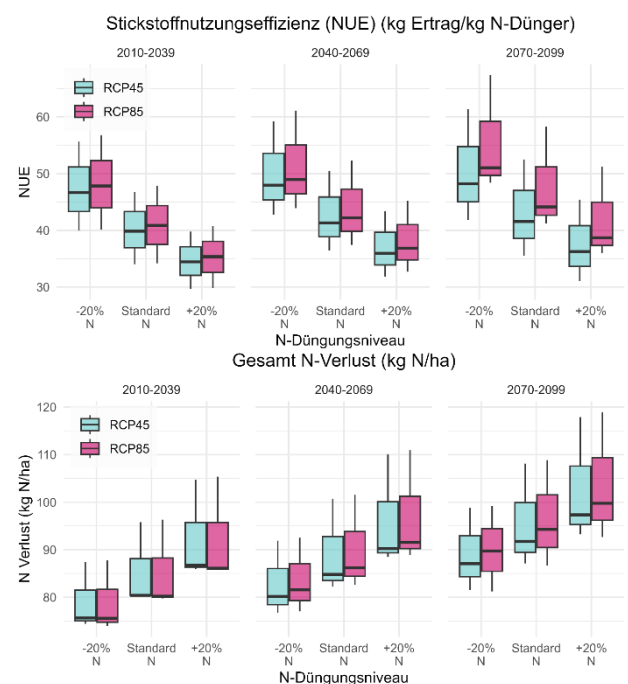


Abbildung 5: Projizierte Entwicklung der NUE des Kornertrags (oben) und der Gesamt N-Verluste (unten) bei sinkenden und steigendem N-Input zu Anfang, Mitte und Ende des Jahrhunderts.

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 CO₂-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 CO₂-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:



Bundesministerium
für Landwirtschaft, Ernährung
und Heimat

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages