



Bayerisches Staatsministerium für  
Ernährung, Landwirtschaft und Forsten



EUROPÄISCHE UNION  
Europäischer Landwirtschafts-  
fonds für die Entwicklung des  
ländlichen Raums

## Innovationen in der bayerischen Landwirtschaft – EIP-Agri

# Verbesserung der Stickstoffeffizienz mittels Albrecht- Methode und punktgenauer Bodenanalysen durch satellitengestützte Daten

### Abschlussbericht

Projektnummer: EP4-904

M. Sc. Matthias Stettmer

Dipl.-Ing. Jürgen Schwarzensteiner

Dr. Franz-Xaver Maidl

Prof. Dr. Heinz Bernhardt

Förderzeitraum: 17.03.2020 bis 31.03.2023

Irlbach, 06.06.2023



## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	2
Abbildungsverzeichnis .....	3
Tabellenverzeichnis .....	4
1 Autoren .....	5
2 Projekttitel .....	5
3 Zuwendungsempfänger .....	5
4 Leadpartner .....	5
5 Mitglieder der Operationellen Gruppe (OG) .....	6
6 Kurzfassung in deutscher Sprache .....	6
7 Summary in english .....	7
8 Projektgebiet .....	7
9 Gesamtbudget .....	9
10 Ausgangssituation und Bedarf .....	9
11 Projektziele und konkrete Aufgabenstellung .....	11
12 Projektverlauf .....	13
13 Projektergebnisse .....	16
13.1 Darstellung der Ergebnisse .....	16
13.1.1 Versuchsjahr 2020 .....	16
13.1.2 Versuchsjahr 2021 .....	19
13.1.3 Versuchsjahr 2022 .....	21
13.2 Diskussion der Ergebnisse .....	24
13.3 Zusammenfassung der Ergebnisse .....	27
14. Verwertung der Ergebnisse .....	29
14.1 Zielerreichung .....	29
14.2 Nutzen für die Praxis und (geplante) Verwertung .....	30
14.3 Beitrag der Ergebnisse zu förderpolitischen EIP-Zielen .....	30
15 Wirtschaftliche und wissenschaftliche Anschlussfähigkeit und weiterführende Fragestellungen ..	31
16 Kommunikations- und Disseminationskonzept .....	31
Literaturverzeichnis .....	33

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Projektgebiet.....	8
Abbildung 2: Erzielter Weizenertrag in dt/ha (86 % TM) im Hohertragsbereich nach Anwendung der einzelnen Düngesysteme mit Angabe der gesamten applizierten N-Menge (dargestellt sind Mittelwerte und Standardfehler, n=4) .....	16
Abbildung 3: Erzielter Weizenertrag in dt/ha (86 % TM) im Mittlertragsbereich nach Anwendung der einzelnen Düngesysteme mit Angabe der gesamten applizierten N-Menge (dargestellt sind Mittelwerte und Standardfehler, n=4) .....	17
Abbildung 4: Erzielter Weizenertrag in dt/ha (86 % TM) im Niedrigertragsbereich nach Anwendung der einzelnen Düngesysteme mit Angabe der gesamten applizierten N-Menge (dargestellt sind Mittelwerte und Standardfehler, n=4) .....	17
Abbildung 5: Rohproteingehalt in % der Varianten Satellit vs. Satellit + Kinsey (dargestellt sind Mittelwerte, n=4) .....	18
Abbildung 6: Stickstoffeffizienzen der Düngesysteme (dargestellt sind Mittelwerte und Standardfehler, n=4) .....	18
Abbildung 7: Erzielter Weizenertrag in dt/ha (86 % TM) im Hohertragsbereich nach Anwendung der einzelnen Düngesysteme mit Angabe der gesamten applizierten N-Menge (dargestellt sind Mittelwerte und Standardfehler, n=4) .....	19
Abbildung 8: Erzielter Weizenertrag in dt/ha (86 % TM) im Mittlertragsbereich nach Anwendung der einzelnen Düngesysteme mit Angabe der gesamten applizierten N-Menge (dargestellt sind Mittelwerte und Standardfehler, n=4) .....	20
Abbildung 9: Erzielter Weizenertrag in dt/ha (86 % TM) im Niedrigertragsbereich nach Anwendung der einzelnen Düngesysteme mit Angabe der gesamten applizierten N-Menge (dargestellt sind Mittelwerte und Standardfehler, n=4) .....	20
Abbildung 10: Stickstoffeffizienzen der Düngesysteme (dargestellt sind Mittelwerte und Standardfehler, n=4) .....	21
Abbildung 11: Erzielter Weizenertrag in dt/ha (86 % TM) im Hohertragsbereich nach Anwendung der einzelnen Düngesysteme mit Angabe der gesamten applizierten N-Menge (dargestellt sind Mittelwerte und Standardfehler, n=4) .....	22
Abbildung 12: Erzielter Weizenertrag in dt/ha (86 % TM) im Mittlertragsbereich nach Anwendung der einzelnen Düngesysteme mit Angabe der gesamten applizierten N-Menge (dargestellt sind Mittelwerte und Standardfehler, n=4) .....	22
Abbildung 13: Erzielter Weizenertrag in dt/ha (86 % TM) im Niedrigertragsbereich nach Anwendung der einzelnen Düngesysteme mit Angabe der gesamten applizierten N-Menge (dargestellt sind Mittelwerte und Standardfehler, n=4) .....	23
Abbildung 14: Stickstoffeffizienzen der Düngesysteme (dargestellt sind Mittelwerte und Standardfehler, n=4) .....	23
Abbildung 15: Ertragsunterschiede durch die Anwendung der Albrecht/Kinsey-Empfehlung bei gleicher N-Düngung.....	28
Abbildung 16: Unterschiede bei der N-Effizienz durch die Anwendung der Albrecht/Kinsey- Empfehlung bei gleicher N-Düngung.....	28
Abbildung 17: Lineare Korrelation zwischen Stickstoffeffizienz und N-min-Gehalt (0-90 cm) nach der Ernte der Versuchspartellen .....	30

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Standort- und Wetterbedingungen in Makofen.....	8
Tabelle 2: Darstellung Zeitplan mit Arbeitspaketen in Anlehnung an ein Gantt-Diagramm .....	14
Tabelle 3: Grunddüngung nach Standardbodenuntersuchung bzw. nach Albrecht/Kinsey im Hohertragsbereich 2022 .....	26
Tabelle 4: Durchschnittliche Mehrerlöse in €/ha der Variante 5 gegenüber Variante 4 durch die erhöhten Weizenenerträge bei einem Verkaufspreis von 20 €/dt und 30€/dt .....	27

## 1 Autoren

M. Sc. Matthias Stettmer; OG Düngoptimierung

Dipl.-Ing. Jürgen Schwarzensteiner; Farmtastic Consulting/OG Düngoptimierung

Dr. Franz-Xaver Maidl; Farmtastic Consulting

Prof. Dr. Heinz Bernhardt; TU München

## 2 Projekttitle

Deutsch: *Verbesserung der Stickstoffeffizienz mittels Albrecht-Methode und punktgenauer Bodenanalysen durch satellitengestützte Daten*

Englisch: *Improving nitrogen efficiency using the Albrecht method and precise soil analyses using satellite-based data*

## 3 Zuwendungsempfänger

OG Düngoptimierung Niederbayern GbR

Graf-von-Bray-Straße 14

94342 Irlbach

Ansprechpartner:

Vertreten durch Jürgen Schwarzensteiner, Geschäftsführer Farmtastic Consulting (Leadpartner)

Telefon: +4915116544403

Mail: [js@farmtastic.consulting](mailto:js@farmtastic.consulting)

Internet: [www.farmtastic.consulting](http://www.farmtastic.consulting)

## 4 Leadpartner

Farmtastic Consulting GmbH

Graf-von-Bray-Straße 14

94342 Irlbach

Ansprechpartner:

Jürgen Schwarzensteiner, Geschäftsführer

Telefon: +4915116544403

Mail: [js@farmtastic.consulting](mailto:js@farmtastic.consulting)

Internet: [www.farmtastic.consulting](http://www.farmtastic.consulting)

## 5 Mitglieder der Operationellen Gruppe (OG)

### Farmtastic Consulting GmbH

Ansprechpartner: Jürgen Schwarzensteiner

### Poschinger-Bray'sche Güterverwaltung

Ansprechpartner: Franz-Gabriel Freiherr von Poschinger-Bray

### Technische Universität München, Lehrstuhl für Agrarsystemtechnik

Ansprechpartner: Prof. Dr. Heinz Bernhardt

## 6 Kurzfassung in deutscher Sprache

Im vorliegenden EIP-Agri Innovationsprojekt wurden verschiedene Stickstoffdüngesysteme (DSN, Sensorsystem TUMA, Yara N-Tester, Vista N-Manager Pro und Vista N-Manager Pro + Albrecht/Kinsey) in Winterweizen zur Verbesserung der Stickstoffeffizienz untersucht. Einer der Kernaspekte dabei war es, herauszufinden, ob die Berücksichtigung einer Düngempfehlung nach der Albrecht/Kinsey-Methode anhand satellitendatenbasierter Bodenproben eine Verbesserung der Stickstoffeffizienz herbeiführt. Dazu wurden in den Jahren 2020, 2021 und 2022 Parzellenversuche (vollrandomisiert und vierfach wiederholt) in unterschiedlichen Ertragszonen durchgeführt. Die Ergebnisse bestätigen die Schlussfolgerungen vorangegangener Untersuchungen und zeigen, dass eine teilflächenspezifische Stickstoffdüngung dazu beiträgt die N-Effizienz zu verbessern, die N-Bilanz zu senken und eine präzise Düngerapplikation beziehungsweise an den Stickstoffbedarf der Pflanzen zu erreichen (MAIDL ET AL. 2004; MULLA 2013; LIU ET AL. 2018; PRÜCKLMAIER 2020; ARGENTO ET AL. 2021; WECKESSER ET AL. 2021; SCHUSTER ET AL. 2022). Gleichzeitig legen die Ergebnisse dar, dass die Berücksichtigung der Albrecht/Kinsey-Düngempfehlung tatsächlich einen weiteren Beitrag zur Verbesserung der Stickstoffeffizienz leisten kann. So konnte bei gleicher Stickstoffdüngung (Höhe und Verteilung der Gaben) die N-Effizienz im Durchschnitt der drei Versuchsjahre um rund 9 % verbessert und ein durchschnittlicher Mehrertrag von rund 6 dt/ha generiert werden. Diese Zahlen bestätigen, dass der Innovationsansatz zur Erreichung des Projektzieles, der Optimierung der Stickstoffeffizienz, beitragen kann und in der Folge einen möglichen Lösungsansatz für den Interessenskonflikt der Praxis zwischen intensiver landwirtschaftlicher Produktion und dem Umweltschutz darstellt. Weitere Untersuchungen an anderen Standorten und in weiteren ackerbaulich relevanten Kulturen sind aber dringend erforderlich, um diese Erkenntnisse noch konkreter beleuchten und bestätigen zu können.

## 7 Summary in english

In the present EIP-Agri innovation project, various nitrogen fertilizer systems (DSN, sensor system TUMA, Yara N-Tester, Vista N-Manager Pro and Vista N-Manager Pro + Albrecht/Kinsey) were investigated in winter wheat to improve nitrogen efficiency. One of the main aspects was to investigate, if a fertilizer recommendation according to the Albrecht/Kinsey method combined with satellite data-based soil samples leads to an improved nitrogen efficiency. For this purpose, plot trials (fully randomized and repeated four times) were carried out in different yield zones in 2020, 2021 and 2022. The results confirm the conclusions of previous studies and show that site-specific nitrogen fertilization contributes to improving N efficiency, reducing the N balance, and achieving precise fertilizer application in relation to the plants' nitrogen requirements (MAIDL ET AL. 2004; MULLA 2013; LIU ET AL. 2018; PRÜCKLMAIER 2020; ARGENTO ET AL. 2021; WECKESSER ET AL. 2021; SCHUSTER ET AL. 2022). In addition, the results show that taking the Albrecht/Kinsey fertilizer recommendation into account can actually make a further contribution to improving nitrogen efficiency. With the same nitrogen fertilization (amount and splitting), the N efficiency was improved by around 9 % on average and an average additional yield of around 6 dt/ha was generated (over the three experimental years). These results confirm that the innovation approach can contribute to the achievement of the project goal, the optimization of nitrogen efficiency, and consequently represents a possible solution to the conflict of interests in practice between intensive agricultural production and environmental protection. However, further investigations at other locations and in other crops relevant to arable farming are urgently needed to be able to examine and confirm these findings even more specifically.

## 8 Projektgebiet

Die Untersuchungen zum vorliegenden EIP-Agri Innovationsprojekt wurden auf Feldern des Gut Makofen (48°81'55" N 12°74'31" E), 115 km nordöstlich von München, durchgeführt (Abbildung 1). Die Versuchsflächen liegen inmitten des Gäubodens, einer Region, die auf Grund ihrer äußerst fruchtbaren Lössböden von der ackerbaulichen Nutzung geprägt ist. Besonders der Anbau von Getreide, Kartoffeln und Zuckerrüben ist in diesem Gebiet dominierend. Tabelle 1 zeigt die wichtigsten Standort- und Wetterbedingungen in Makofen.

EIP-Agri Innovationsprojekt: Verbesserung der Stickstoffeffizienz mittels Albrecht-Methode und punktgenauer Bodenanalysen durch satellitengestützte Daten

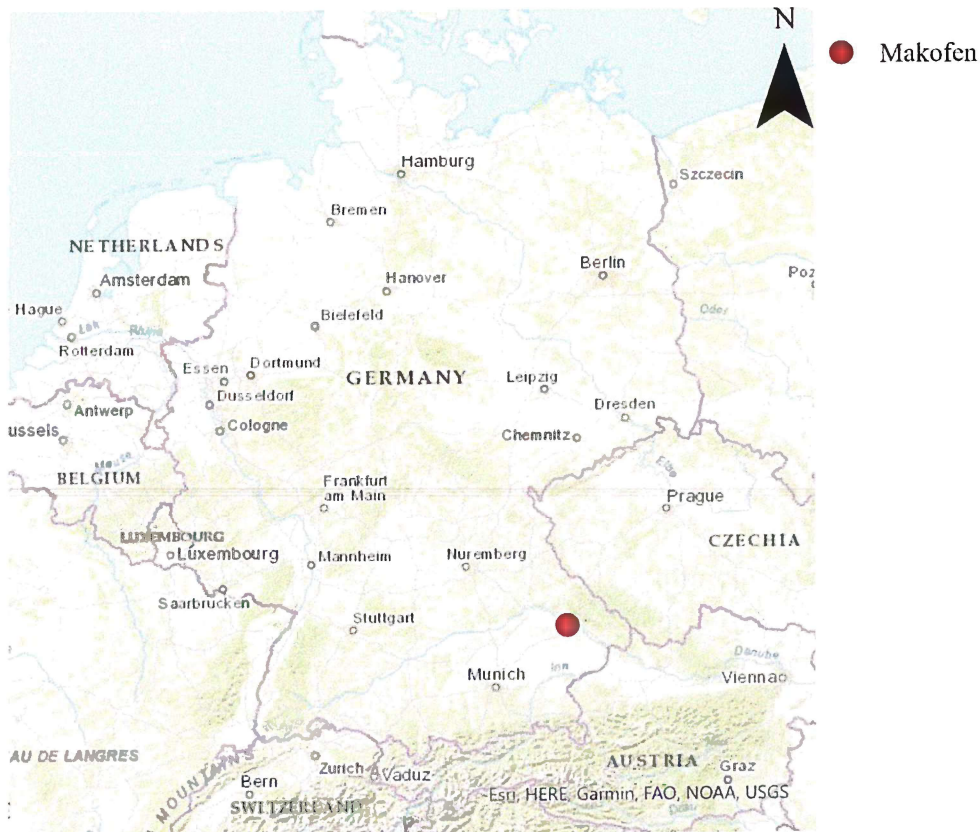


Abbildung 1: Projektgebiet

Tabelle 1: Standort- und Wetterbedingungen in Makofen

Eigenschaft	Makofen
Region	Niederbayern
Landkreis	Straubing-Bogen
Höhe über NN (m)	322
Bodenart	Schluffiger Lehm
Mittlerer Sandgehalt (0–30 cm) (%)	6,5
Mittlerer Schluffgehalt (0–30 cm) (%)	69,7
Mittlerer Tongehalt (0–30 cm) (%)	23,8
Mittlere nutzbare Feldkapazität (in 10 cm) (Vol.%)	23,6
Mittlerer Gehalt an organischem Kohlenstoff (0–30 cm) (% TM)	1,3
Mittlerer Gesamtstickstoffgehalt (0–30 cm) (% TM)	0,13
Mittlerer pH-Wert (0–30 cm)	6,7
Mittlerer P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -Gehalt (0–30 cm) (mg/100g Boden)	16,4
Mittlerer K <sub>2</sub> O-Gehalt (0–30 cm) (mg/100g Boden)	18,1
Mittlere Jahrestemperatur <sup>a</sup> (°C)	9,5
Mittlerer Jahresniederschlag <sup>a</sup> (mm)	781

<sup>a</sup> Durchschnitt der letzten 20 Jahre



Das Projekt und seine Ergebnisse sind sowohl in der Untersuchungsregion in Bayern selbst aber auch auf Bundes- und EU-Ebene von großer Bedeutung. Umweltschutz, Grundwasserschutz und die Produktion hochwertiger Lebensmittel unterliegen letztlich auf globaler Ebene einer großen Wichtigkeit. Das Projekt zeigt, dass sich Landwirte für eine optimierte Düngung und den Umweltschutz einsetzen, was von Relevanz für die gesamte Weltbevölkerung ist. Die Versuchsanstellung fand in Winterweizen statt, welcher sowohl in Bayern als auch auf Bundes- und EU-Ebene die wichtigste Ackerkultur darstellt (BOOGAARD ET AL. 2013; SVOBODA ET AL. 2015). Mit einer Anbaufläche von rund 2,9 Millionen Hektar wird Winterweizen auf etwas mehr als der Hälfte der gesamten deutschen Getreideanbaufläche produziert (STATISTISCHES BUNDESAMT 2022). Auf Grund geeigneter klimatischer Bedingungen und eines hohen Ertragspotentials der Böden in vielen Regionen, ist die erfolgreiche Winterweizenproduktion von enormer wirtschaftlicher Bedeutung für die deutsche Landwirtschaft. Insbesondere in Gebieten mit hervorragender Bonität und ausreichend Niederschlägen, wie im niederbayerischen Gäuboden, können mit höchster Intensität Spitzenerträge von bis zu 120 dt/ha erwirtschaftet werden. Eine intensive Produktion bedingt jedoch auch eine intensive Bestandesführung und dazu zählt auch maßgeblich die Düngung, insbesondere mit Stickstoff (MAIDL ET AL. 1998; MOHAMMED ET AL. 2013). Daher hat dieses Innovationsvorhaben mit dem Ziel der Verbesserung der Stickstoffeffizienz im Winterweizenanbau einen enormen Stellenwert für bayerische Landwirte, ist aber auch genauso auf Bundes- und EU-Ebene von entsprechender Relevanz.

## 9 Gesamtbudget

Die Planung des Projektes ergab Gesamtausgaben brutto von 563.535,38 EUR. Zur Finanzierung des Projektes wurde im Zuwendungsbescheid vom 17.03.2020 ein Budget (Zuschuss/Projektförderung) von vorläufig bis zu maximal 395.221,59 EUR bewilligt. Die Differenz wird durch eigene Finanzierungsmittel der OG getragen.

## 10 Ausgangssituation und Bedarf

Der Projektinitiator Jürgen Schwarzensteiner beschäftigte sich erstmals im Jahr 2010 im Zuge seiner damaligen Funktion als Betriebsleiter der Poschinger Bray'schen Güterverwaltung mit teilflächenspezifischer Düngung. Dabei stellte er, wie auch andere Praktiker und Wissenschaftler verschiedener Institutionen, durch seine Arbeit im Landwirtschaftsbetrieb und der Poschinger Bray'schen Agrarakademie sowie durch verschiedene Versuchsanstellungen (v.a. studentische Abschlussarbeiten) großes Potential dieses Verfahrens fest. Wesentliche Aspekte der teilflächenspezifischen Ausbringung von Düngemitteln sind die Verbesserung der Nährstoffeffizienz

(insbesondere bei Nährstoffen mit hohem Verlustpotential, wie Stickstoff) und das Erreichen ausgeglichener Nährstoffbilanzen, wodurch ein aktiver Beitrag zum Umweltschutz geleistet wird (MAIDL ET AL. 2004; MULLA 2013; LIU ET AL. 2018; PRÜCKLMAIER 2020; ARGENTO ET AL. 2021; WECKESSER ET AL. 2021; SCHUSTER ET AL. 2022). Weiterhin wurde im Landwirtschaftsbetrieb der Poschinger-Bray'schen Güterverwaltung nach und nach auch auf eine teilflächenspezifische Bodenbeprobung gesetzt. Des Weiteren wurden erste Erfahrungen mit der Albrecht/Kinsey-Methode gesammelt.

Vor dem Hintergrund der Novellierung der Düngeverordnung bei der Umsetzung der EU-Nitratrichtlinie gab die Düngeverordnung 2017 erstmals eine Ausweisung von Nitrat belasteten sowie eutrophierten Gebieten vor. Die daraus resultierenden Konsequenzen für landwirtschaftliche Betriebe bei der Düngung ihrer Kulturen führten dazu, dass der gesamte Agrarsektor verstärkt damit begann, sich intensiv mit Möglichkeiten und Wegen zur Verbesserung der Stickstoffeffizienz zu befassen. Eine wesentliche Problemstellung waren dabei die Regulationen zur Stickstoffdüngung in Roten Gebieten, in welchen beispielsweise eine für manche Kulturen und Zwischenfrüchte fachlich durchaus sinnvolle Herstdüngung untersagt sowie insgesamt eine Begrenzung der Düngung auf nur noch 80 % des Stickstoffbedarfes eingeführt wurde. Dies führte zu einem maßgeblichen Interessenskonflikt in der landwirtschaftlichen Praxis, der bis dato nicht vollständig gelöst werden konnte. Einerseits sind Vorgaben zur Stickstoffdüngung in Folge der hohen Nitratwerte im Grundwasser in vielen Regionen unumgänglich; andererseits führt eine Düngung unterhalb des Bedarfes langfristig zu Ertrags- und Qualitätseinbußen. Zusätzlich erschwerend kommt die Tatsache hinzu, dass insgesamt ein zunehmendes Bevölkerungswachstum bei zugleich rückläufiger nutzbarer landwirtschaftlicher Fläche zur Produktion von Lebensmitteln in Folge von Versiegelung durch Bau von Wohnraum, Industrie oder Infrastruktur zu verzeichnen ist (Döös 2002). Daher ist es ebenso unumgänglich Lösungen zu finden, um die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen zu verbessern, sodass zukünftig eine möglichst nährstoffeffiziente Produktion von Lebensmitteln die Existenz der Landwirtschaft und unserer Ernährung sowie den Umweltschutz bestmöglich vereint und so diesem Zielkonflikt Rechnung getragen werden kann. In diesem Kontext hatten sich bereits teilflächenspezifische Stickstoffdüngesysteme am Markt etabliert. Dabei haben sich in diversen Untersuchungen Systeme basierend auf der Methodik des Online + Map-Overlay Verfahrens als vielversprechend erwiesen (MAIDL ET AL. 2004; SCHMIDHALTER 2014; PRÜCKLMAIER 2020).

In diesem Zusammenhang ergab sich für die Projektinitiatoren auf Basis ihrer praktischen Erfahrungen die Idee, durch die Verknüpfung vorhandener und erprobter teilflächenspezifischer Düngesysteme mit einer alternativen Düngeempfehlung anhand einer Albrecht/Kinsey-Bodenanalyse, gewonnen durch satellitendatenbasierte punktgenaue Bodenproben, die Stickstoffeffizienz weiter zu verbessern und so den Umweltschutz und die intensive Nahrungsmittelproduktion besser in Einklang zu bringen. Jedoch

lagen kaum aussagekräftige unabhängige Evaluationen der am Markt befindlichen etablierten teilflächenspezifischen Düngesysteme vor und erst recht nicht unter Einbezug der Albrecht/Kinsey-Methode. So werden Düngeempfehlungen der Albrecht/Kinsey-Methode oft sehr kritisch dargestellt, obwohl diese immer mehr Praktiker erfolgreich anwenden. Leider liegen so gut wie keine relevanten, wissenschaftlichen Versuchsdaten zu der Albrecht/Kinsey-Methode vor, die eine vernünftige Beurteilung der Methode ermöglichen würden. Das Bestreben diese Wissenslücke zu schließen und mehr Erkenntnisse zu gewinnen, führten zum Zusammenschluss der OG Düngeoptimierung Niederbayern und zur Durchführung des Innovationsprojektes.

## 11 Projektziele und konkrete Aufgabenstellung

Das Hauptziel des Projektes ist die Verbesserung der Stickstoffeffizienz im Ackerbau. Die Stickstoffaufnahme des Ernteproduktes und die eingesetzte Menge an Stickstoffdünger sind die wesentlichen Stellschrauben, aus denen sich die N-Effizienz ergibt. Durch den Innovationsansatz sollen diese beiden Faktoren entsprechend beeinflusst werden, sodass sich eine verbesserte N-Effizienz mit in der Folge reduzierten Stickstoffeinträgen in die Umwelt ergibt.

Zu nachfolgenden Aspekten und Fragestellungen soll das Projekt Erkenntnisse und Antworten liefern:

- Wie ist die Praxistauglichkeit und Effizienz teilflächenspezifischer Düngesysteme, insbesondere von Systemen der favorisierten Online + Map-Overlay – Methodik, zu bewerten?
- Wie wirken sich diese Systeme auf Nitratrückstände nach der Ernte aus?
- Lässt sich die Stickstoffeffizienz durch eine Kombination der bestehenden teilflächenspezifischen Düngesysteme und einer Düngeempfehlung nach der Albrecht/Kinsey-Methode anhand satellitendatenbasierter Bodenproben verbessern?

Die Aufgabenstellung des Projektes lautete nachfolgende Versuchsvarianten in Winterweizen anhand von Parzellenversuchen (vollrandomisiert und vierfach wiederholt) in Bereichen unterschiedlichen Ertragspotentials (hoch, mittel, niedrig) hinsichtlich ihres Beitrages zur Verbesserung der Stickstoffeffizienz zu bewerten:

1. Düngeberatungssystem Stickstoff (DSN)
2. Sensor gestützte N-Düngung (TUM-Algorithmus)
3. Yara (N Tester-Algorithmus)
4. Satelliten gestützte N-Düngung (Vista)
5. Satelliten gestützte N-Düngung (Vista) + Albrecht/Kinsey Empfehlung
6. N-Stufe 1: 0 kg N (0/0/0)

7. N-Stufe 2: 120 kg N (40/40/40)
8. N-Stufe 3: 160 kg N (60/60/40)
9. N-Stufe 4: 200 kg N (80/80/40)
10. N-Stufe 5: 240 kg N (80/80/80)

Dabei ergibt sich auf den ersten Blick eine methodische Schwierigkeit; so werden bei diesem Vorgehen verschiedene Stickstoffdüngesysteme miteinander verglichen, während eine Düngeempfehlung basierend auf einer Albrecht/Kinsey-Bodenuntersuchung gar keine Empfehlung für Stickstoff ausgibt. Jedoch wird die Effizienz der Stickstoffdüngung neben den direkten Faktoren (Menge, Form und Verteilung der Stickstoffdüngung) und den nicht veränderbaren Faktoren (Standort und Klima) auch ganz wesentlich von indirekten Faktoren (u. a. Bodenbearbeitung, Grunddüngung, Fruchtfolge, Pflanzenschutz) beeinflusst (BAUMGÄRTEL 2012). Zielvariable dieses Projektes ist der Faktor Düngung. Die weiteren indirekten Faktoren werden alle einheitlich optimal durchgeführt und somit ist eine Vergleichbarkeit gewährleistet.

Hintergrund dazu ist, dass das Pflanzenwachstum und die daraus resultierende Stickstoffaufnahme aus Sicht der Pflanzenernährung nicht nur durch die vorhandene pflanzenverfügbare Menge an Stickstoff (Boden N + durch Düngung zugeführter N), sondern auch durch die vorhandenen pflanzenverfügbaren Mengen vieler weiterer wichtiger Makro- und Mikronährstoffe beeinflusst werden. So wird beispielsweise ein im Wachstum gehemmter Pflanzenbestand in der Folge von Phosphor- (Zellbaustein sowie für DNS und RNS, Bestandteil wichtiger Enzyme, etc.) oder Kaliummangel (Festigung der Zellwände, Regulation des Wasserhaushaltes, etc.) trotz angemessener Stickstoffversorgung (hinsichtlich des Ertragspotentials des entsprechenden Standortes) eine schlechte Stickstoffeffizienz erzielen. Diese pflanzenbaulich grundlegenden Zusammenhänge wurden in Anlehnung an das Liebigsche Minimumgesetz bereits in vielen Untersuchungen erläutert (WAGGONER UND NORVELL 1979; LANZER UND PARIS 1981; FERREIRA ET AL. 2017). Daher wird in der landwirtschaftlichen Produktion durch die Grunddüngung eine optimale Versorgung aller anderen wichtigen Nährstoffe neben Stickstoff angestrebt (FÖLSCH UND OTTER-NACKE 2010; WAGNER UND MARZ 2017). Diese Maßnahmen erfolgen in der Regel auf Grundlage von Standardbodenuntersuchungen (Bodenart, pH-Wert, P, K und evtl. Mg und Spurenelemente), welche nach Düngeverordnung spätestens alle sechs Jahre auf einer Ackerfläche durchzuführen sind (verpflichtend ist eine Untersuchung von Bodenart, pH-Wert, P und K; Mg und Spurenelemente sind freiwillig). Dabei stellt die Albrecht/Kinsey-Bodenanalyse und die daraus resultierende Düngeempfehlung eine alternative Datenbasis zur Grunddüngung neben der Düngeempfehlung anhand der Standardbodenuntersuchung dar. Diesen Aspekt griff das vorliegende EIP-Projekt auf, sodass in den Versuchspartellen Bodenproben beider Arten

(Standardbodenuntersuchung inkl. Mg und Spurenelemente sowie System Albrecht/Kinsey) genommen und analysiert wurden. Anhand der Ergebnisse wurden in den jeweiligen Parzellen zu Vegetationsbeginn die Grunddüngungsmaßnahmen als Basis für den Vergleich der Stickstoffdüngesysteme durchgeführt. In der Umsetzung bedeutete dies, dass je nach Düngeempfehlung in allen Parzellen die Grunddüngung anhand der Standardbodenuntersuchung durchgeführt wurde, außer in den Parzellen der Variante 5, dort erfolgte dies anhand der Albrecht/Kinsey-Empfehlung. Die Annahme der Projektinitiatoren war, dass die Grunddüngung nach Albrecht/Kinsey-Methode gegenüber der nach Standardbodenuntersuchung eine bessere Ausgangslage für den Pflanzenbestand schaffen sollte, sodass möglicherweise bei gleicher oder reduzierter Stickstoffdüngung eine verbesserte Stickstoffeffizienz erzielt werden kann. Um den Unterschied der Grunddüngung nach Standardbodenuntersuchung bzw. Albrecht/Kinsey-Methode unabhängig von der Höhe und Verteilung der Stickstoffgaben vergleichen zu können, wurden zwei Varianten (4. und 5.) nach dem satellitendatenbasierten System Vista identisch mit Stickstoff gedüngt. So konnten einerseits die Stickstoffdüngesysteme (DSN, Sensor, Yara und Satellit) miteinander verglichen werden; und gleichzeitig kann die zentrale Fragestellung bezüglich des Einflusses der unterschiedlichen Grunddüngungsempfehlungen (Standard versus Albrecht/Kinsey) auf die Stickstoffeffizienz unabhängig von der Stickstoffdüngung zwischen Variante 4 und 5 exakt evaluiert werden.

Zur Bewertung der Düngesysteme wurden nachfolgende Bonituren festgelegt:

- **Nmin-Beprobungen:** Vegetationsbeginn, nach Ernte, Beginn Auswaschungsperiode
- **Pflanzenproben** zur Bestimmung der Biomasse und N-Aufnahme an charakteristischen Terminen: BBCH 31/32, BBCH 39, BBCH 55, BBCH 65
- **Bestimmung der Biomassebildung und Stickstoffaufnahme** nach den Systemen Sensor TUM, Yara und Satellit zu o. g. Terminen
- Bestimmung der **Ertragsstrukturparameter** durch Schnitt einer Pflanzenprobe kurz vor der Ernte
- Bestimmung von **Ertrag** und **N-Gehalt** bei der Ernte

## 12 Projektverlauf

Die Projektlaufzeit bzw. der Bewilligungszeitraum des Projektes war von 17.03.2020 bis 31.03.2023. Am 09.03.2023 fand der dazugehörige Ergebnisworkshop statt.

Der Projektverlauf wurde in insgesamt neun Arbeitspakete gegliedert, die sich anhand der verschiedenen schwerpunktmäßigen Arbeiten in den jeweiligen Zeiträumen unterscheiden. Im Nachfolgenden werden, wie bereits in den Ausführungen der einzelnen Fortschrittsberichte, nochmals zusammenfassend die wichtigsten Inhalte der jeweiligen Arbeitspakete erläutert. Tabelle 2 stellt, in Anlehnung an ein Gantt-Diagramm, die zeitliche Abfolge der Projektaktivitäten grafisch dar.

Tabelle 2: Darstellung Zeitplan mit Arbeitspaketen in Anlehnung an ein Gantt-Diagramm

Jahr	2020												2021												2022												2023			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	
Paket 1	■	■	■																																					
Paket 2				■	■	■	■																																	
Paket 3							■	■																																
Paket 4								■	■	■	■	■	■																											
Paket 5																■	■	■																						
Paket 6																			■	■																				
Paket 7																					■	■	■	■																
Paket 8																																								
Paket 9																																								

Die Arbeitspakete 1, 4 und 7 dienten schwerpunktmäßig zur Vorbereitung, Planung, Aussaat und Anlage der Versuche sowie auch zur Auswertung erster Daten (Arbeitspakete 4 und 7). Wesentliche Aufgabenfelder waren dabei die Erstellung der Zonenkarten, die Bodenbeprobung sowie die Planung und Umsetzung der Versuchsanlage. Ein weiterer Schwerpunkt war die Düngeplanung und je nach Vegetationsfortschritt auch teilweise bereits erste Düngemaßnahmen sowie in Arbeitspaket 4 und 7 erste Auswertungen zu den Daten von 2020 und 2021. Mit der Verrechnung der N-Gehalte der Strohproben und der Kalkulation der N-Effizienzen im März 2021, konnte die Kalkulation, Dokumentation und Analyse der Ergebnisse der ersten Versuche von 2020 plangemäß und erfolgreich abgeschlossen werden. In der Folge konnten im April 2021 an den EIP-Agri-Tagen des Agronym e.V., welcher als EIP-Agri-Projekt einen Zertifikatskurs "Digitaler Pflanzenbau im Jahreszyklus" für landwirtschaftliche Praktiker in Sachsen durchführt, bereits erste Ergebnisse präsentiert werden. Im weiteren Projektverlauf wurde der Transfer der Ergebnisse in die landwirtschaftliche Praxis stark forciert. Sofern es die Versuchstätigkeiten erlaubten, wurden Versuchsführungen durchgeführt und an Vortragsveranstaltungen teilgenommen, um bereits vor Projektende erste vorläufige Ergebnisse der landwirtschaftlichen Praxis kommunizieren zu können.

Bei den Arbeitspaketen 2, 5 und 8 lag der Fokus auf Düngung, Bonitur und Beprobung der Versuche. Dabei stellten die Durchführung der Pflanzenproben und die diversen Messungen (Sensor, Satellit, N-Tester etc.) zu den charakteristischen Wachstumsstadien (EC 31/31, EC 39, EC 55, EC 65) die herausforderndsten Arbeitsspitzen dar. Auf Grund der Intensität des Bonitur-Planes und der

Abhängigkeit von der Witterung waren diese Zeiträume stark von den Versuchsarbeiten auf dem Feld geprägt. Parallel wurden die Proben in den Laboren bereits aufbereitet, weiterverarbeitet und analysiert.

Nahtlos ging es anschließend über in die Arbeitspakete 3, 6 und 9, welche von der Ernte geprägt waren. Dabei wurden im Vorfeld ebenfalls Pflanzenproben geschnitten und entnommen sowie Auswertungen diverser Ertragsstrukturparameter durchgeführt. Der Drusch erfolgte mit Parzellenmähdrescher und Großmähdrescher mit Ertragskartierungssystem. Ein weiterer wichtiger Inhalt dieser Arbeitspakete waren die Nmin-Beprobungen nach der Ernte. Während die Arbeitspakete 3 und 6 mit diesen Tätigkeiten abgeschlossen waren, enthielt Arbeitspaket 9 auch den Abschluss des Projektes. Dabei galt der Schwerpunkt den finalen Auswertungen, Veröffentlichungen und dem Transfer der Erkenntnisse in die landwirtschaftliche Praxis. Besondere Highlights waren dabei die Vorstellung des Projektes am Stand der DVS an den DLG-Feldtagen, ein Praxistag mit den Schülern der HLS Rotthalmünster und natürlich der Ergebnisworkshop im März 2023, um nur einige der wichtigsten Veranstaltungen zu erwähnen.

Als Abweichung zwischen Projektplan und Verlauf bleibt zu nennen, dass das Arbeitspaket 1 ursprünglich bereits im Januar 2020 hätte beginnen sollen (vgl. Tabelle 2), in Folge des verspäteten Zuwendungsbescheides vom 17.03.2020 verschob sich der tatsächliche Projektstart entsprechend. Dies hatte zur Folge, dass sich die Tätigkeiten der Arbeitspakete 1 und 2 stark vermischten. Dies musste durch viele Überstunden und extra Engagement durch die OG innerhalb kürzester Zeit kompensiert werden. Alle Tätigkeiten konnten durch diesen Mehraufwand rechtzeitig bewerkstelligt werden, sodass im Jahr 2020 noch ein derartiger Düngeversuch möglich war. Bei zukünftigen Projekten mit vegetationsabhängigen Freilandversuchen sollte dies dringend berücksichtigt werden, da sich solche Verzögerungen in Abhängigkeit von der Vegetation nicht so einfach aufarbeiten und kompensieren lassen und so eine große Gefährdung für den erfolgreichen Abschluss der Projekte darstellen. Die verlorengegangene Zeit zu Beginn des Projektes wurde entsprechend angehängt, sodass sich der Zeitraum des 9. und letzten Arbeitspaketes von ursprünglich Juli 2022 bis Dezember 2022 auf Juli 2022 bis März 2023 verlängerte (vgl. Tabelle 2). Im weiteren Verlauf konnten erfreulicherweise alle Arbeitspakete plangemäß abgearbeitet werden, sodass es zu keinen weiteren Abweichungen vom Projektplan kam. Unabhängig der Arbeitspakete fanden in regelmäßigen Abständen die Teambesprechungen der OG bzw. Kooperationspartner statt, in denen der Stand der Dinge sowie die weitere Planung und Vorgehensweise besprochen wurden. Diese Vorgehensweise erwies sich als sehr gut.

## 13 Projektergebnisse

### 13.1 Darstellung der Ergebnisse

In den nachfolgenden Kapiteln werden zuerst die Ergebnisse der einzelnen Versuchsjahre detailliert dargestellt. Anschließend werden in verschiedenen Übersichten die erzielten Schlussfolgerungen zusammengefasst.

#### 13.1.1 Versuchsjahr 2020

Nachfolgende Abbildungen (2 bis 4) zeigen die Unterschiede der Erträge aus dem ersten Versuchsjahr 2020 in den einzelnen Ertragsbereichen. Als Ertragspotential, auf welches die Stickstoffdüngesysteme düngten, wurden folgende festgelegt: Hohertrag: 105 dt/ha, Mittlerertrag: 95 dt/ha und Niedrigertrag 85 dt/ha. Die Gesamtmenge in kg N/ha, welche in Summe der drei Düngungsmaßnahmen appliziert wurde, ist zusammen mit der Bezeichnung der Variante unter jedem Balken angegeben.

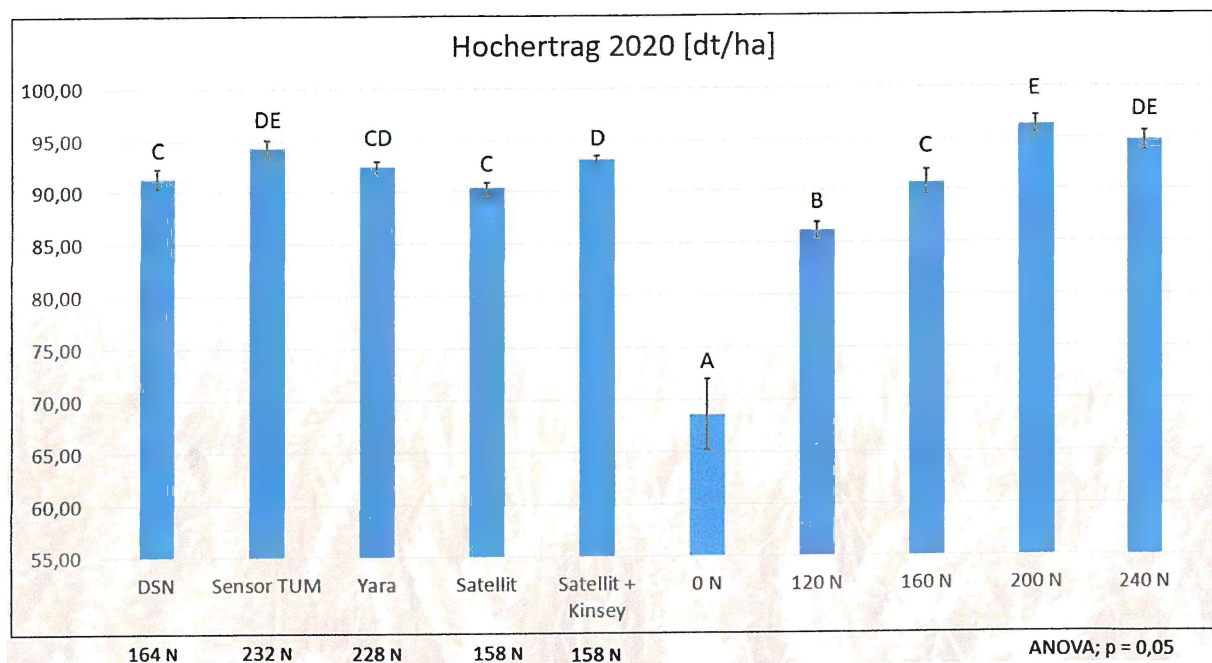


Abbildung 2: Erzielter Weizenertrag in dt/ha (86 % TM) im Hohertragsbereich nach Anwendung der einzelnen Düngesysteme mit Angabe der gesamten applizierten N-Menge (dargestellt sind Mittelwerte und Standardfehler, n=4)



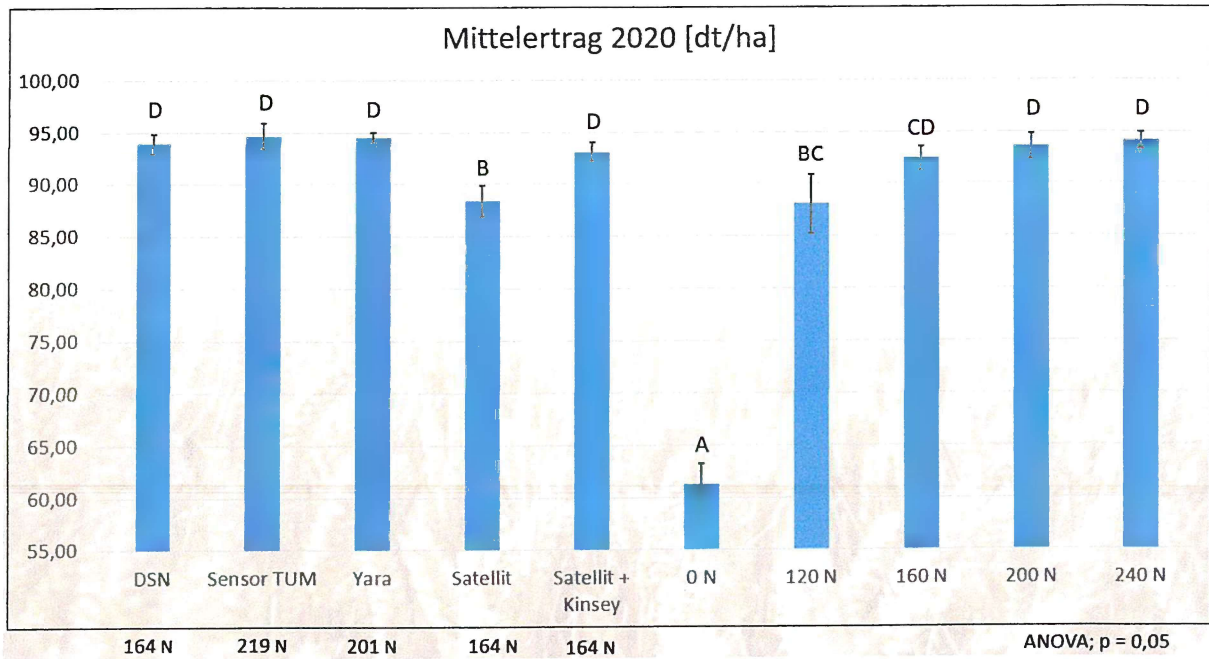


Abbildung 3: Erzielter Weizenertrag in dt/ha (86 % TM) im Mittelertragsbereich nach Anwendung der einzelnen Düngesysteme mit Angabe der gesamten applizierten N-Menge (dargestellt sind Mittelwerte und Standardfehler, n=4)

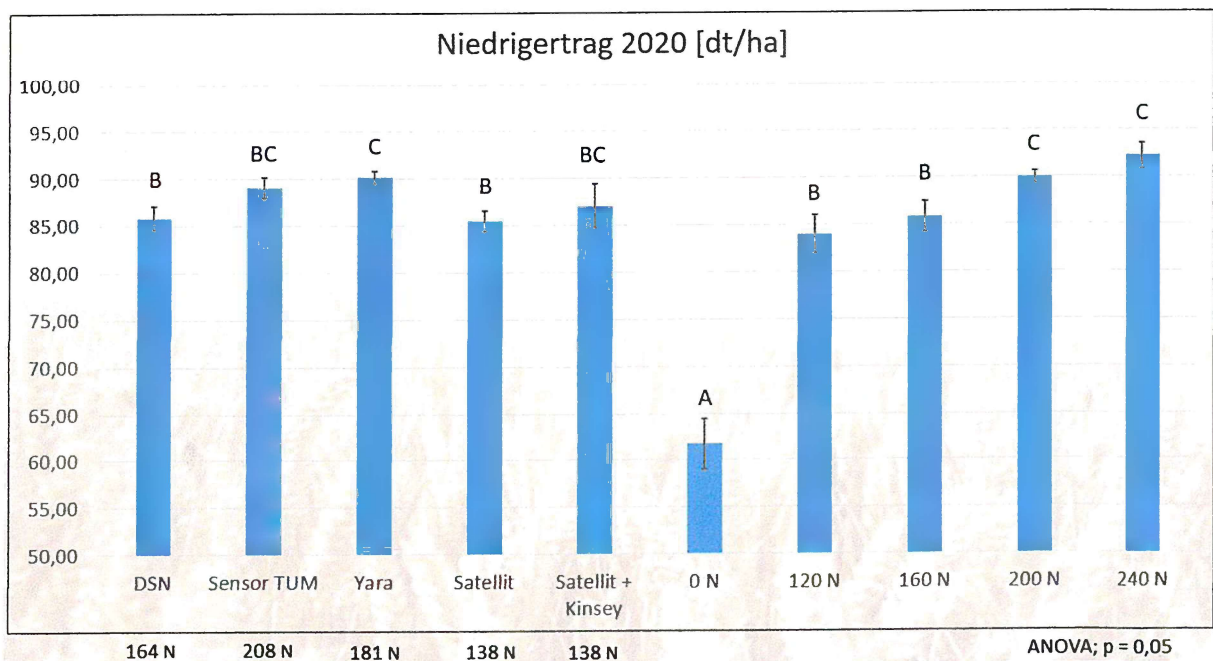


Abbildung 4: Erzielter Weizenertrag in dt/ha (86 % TM) im Niedrigertragsbereich nach Anwendung der einzelnen Düngesysteme mit Angabe der gesamten applizierten N-Menge (dargestellt sind Mittelwerte und Standardfehler, n=4)

Die Ergebnisse zeigen Mehrerträge von 1,5 bis 4,7 dt/ha durch die Anwendung der Albrecht/Kinsey-Empfehlung zwischen Variante Satellit und Satellit + Kinsey. Prinzipiell lassen höhere Erträge bei identischer Stickstoffversorgung durch den Verdünnungseffekt einen geringen Rohproteingehalt erwarten, was zu Einbußen bei der Vermarktung führen kann. Die Ergebnisse der Bestimmung des

Proteingehaltes in Abbildung 5 zeigen, dass dieser Fall nicht eingetreten ist, sondern die N-Aufnahme allgemein erhöht wurde.

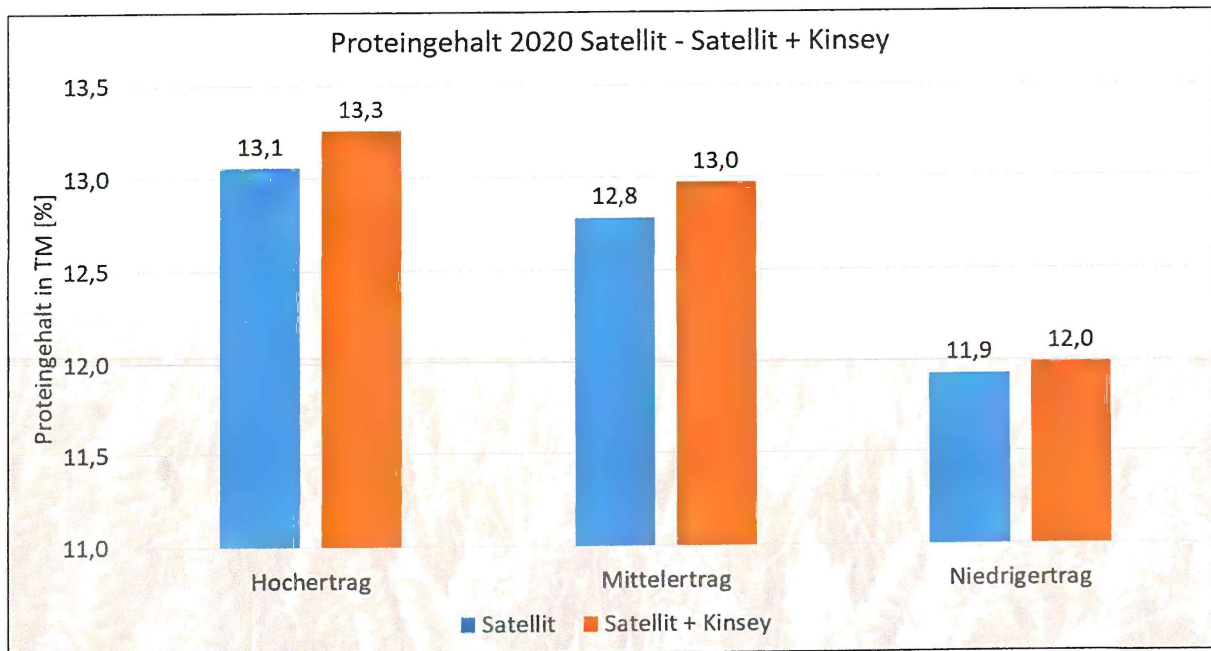


Abbildung 5: Rohproteingehalt in % der Varianten Satellit vs. Satellit + Kinsey (dargestellt sind Mittelwerte, n=4)

Abbildung 6 zeigt die kalkulierten Stickstoffeffizienzen der Düngesysteme im Hoch- (links) und Niedrigertragsbereich (rechts).

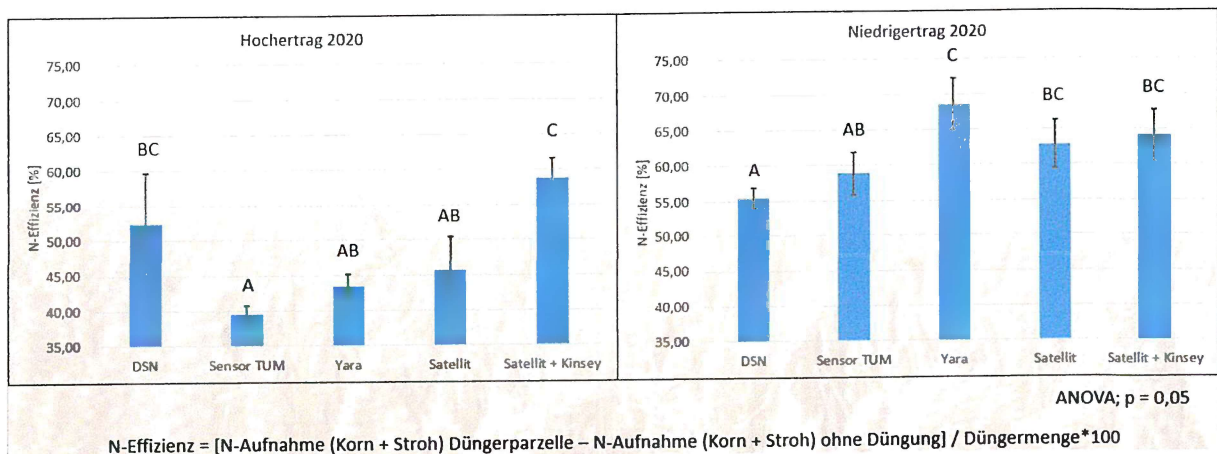


Abbildung 6: Stickstoffeffizienzen der Düngesysteme (dargestellt sind Mittelwerte und Standardfehler, n=4)

Hierbei ist eine Verbesserung der Stickstoffeffizienz durch die Anwendung der Albrecht/Kinsey-Empfehlung zu erkennen. Besonders im Niedrigertragsbereich, der in der Regel das größte Verlustpotential durch Überdüngung aufweist, ist der Beitrag der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung zur Verbesserung der Stickstoffeffizienz klar ersichtlich. So erzielt in dieser Zone das System der schlageinheitlichen Düngung DSN die schlechteste Stickstoffeffizienz. Gleichzeitig müssen

die schlechten Stickstoffeffizienzen im Hohertragsbereich besonders bei den Sensoren relativiert werden. Wie bereits angegeben, wurde in dieser Zone auf ein Ertragspotential von 105 dt/ha gedüngt, was jedoch klar verfehlt wurde (vgl. Abbildung 2). Daher eignen sich diese Zahlen nicht zur Wertung dieser Systeme, da sie durch unzureichend genau gewählte Basisdaten beeinflusst wurden. Weiterhin wird an dieser Stelle die große Bedeutung der Genauigkeit der Ausgangsdaten (Ertragspotentialkarten) für den erfolgreichen Einsatz von Düngealgorithmen ersichtlich.

### 13.1.2 Versuchsjahr 2021

Nachfolgende Abbildungen (7 bis 9) zeigen die Unterschiede der Erträge aus dem zweiten Versuchsjahr 2021 in den einzelnen Ertragsbereichen. Als Ertragspotential, auf welches die Stickstoffdüngesysteme düngten, wurden folgende festgelegt: Hohertrag: 105 dt/ha, Mittlerertrag: 90 dt/ha und Niedrigertrag 80 dt/ha. Die Gesamtmenge in kg N/ha, welche in Summe der drei Düngungsmaßnahmen appliziert wurde, ist zusammen mit der Bezeichnung der Variante unter jedem Balken angegeben.

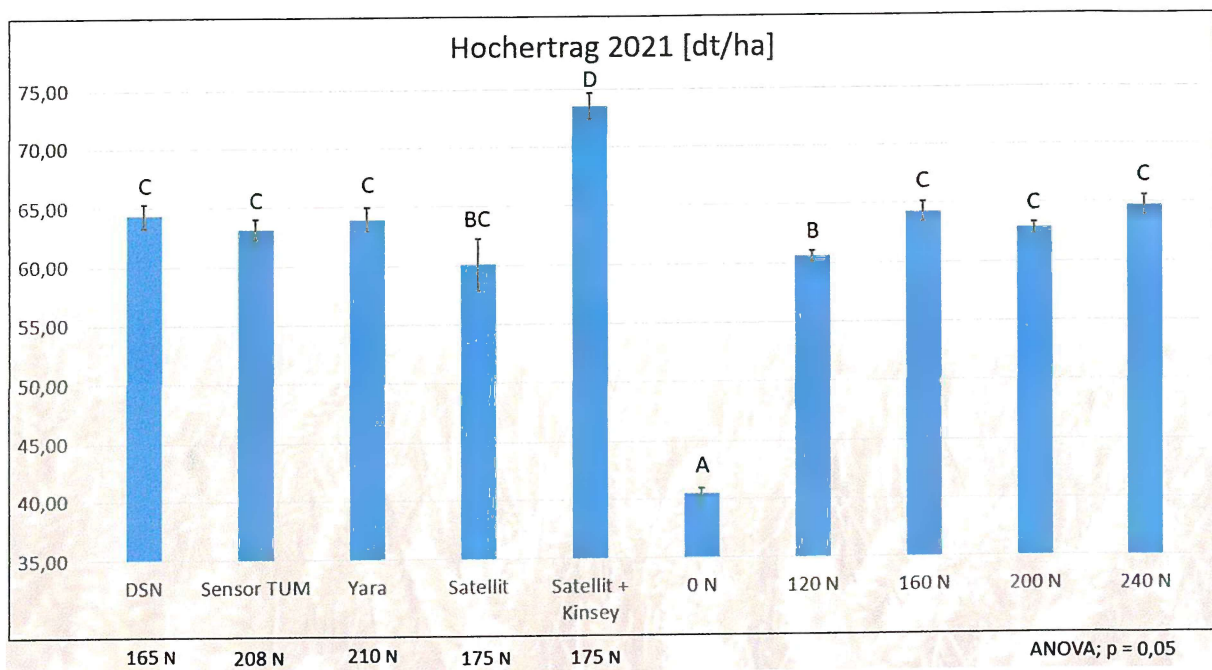


Abbildung 7: Erzielter Weizenertrag in dt/ha (86 % TM) im Hohertragsbereich nach Anwendung der einzelnen Düngesysteme mit Angabe der gesamten applizierten N-Menge (dargestellt sind Mittelwerte und Standardfehler, n=4)

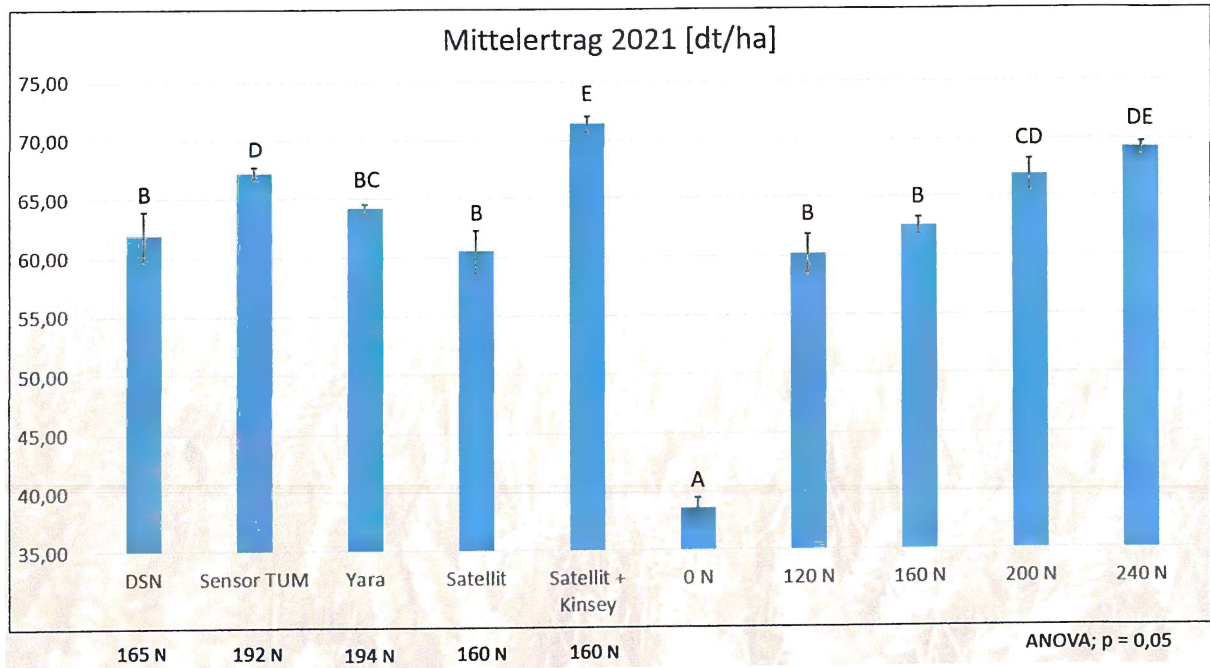


Abbildung 8: Erzielter Weizenertrag in dt/ha (86 % TM) im Mittelertragsbereich nach Anwendung der einzelnen Düngesysteme mit Angabe der gesamten applizierten N-Menge (dargestellt sind Mittelwerte und Standardfehler, n=4)

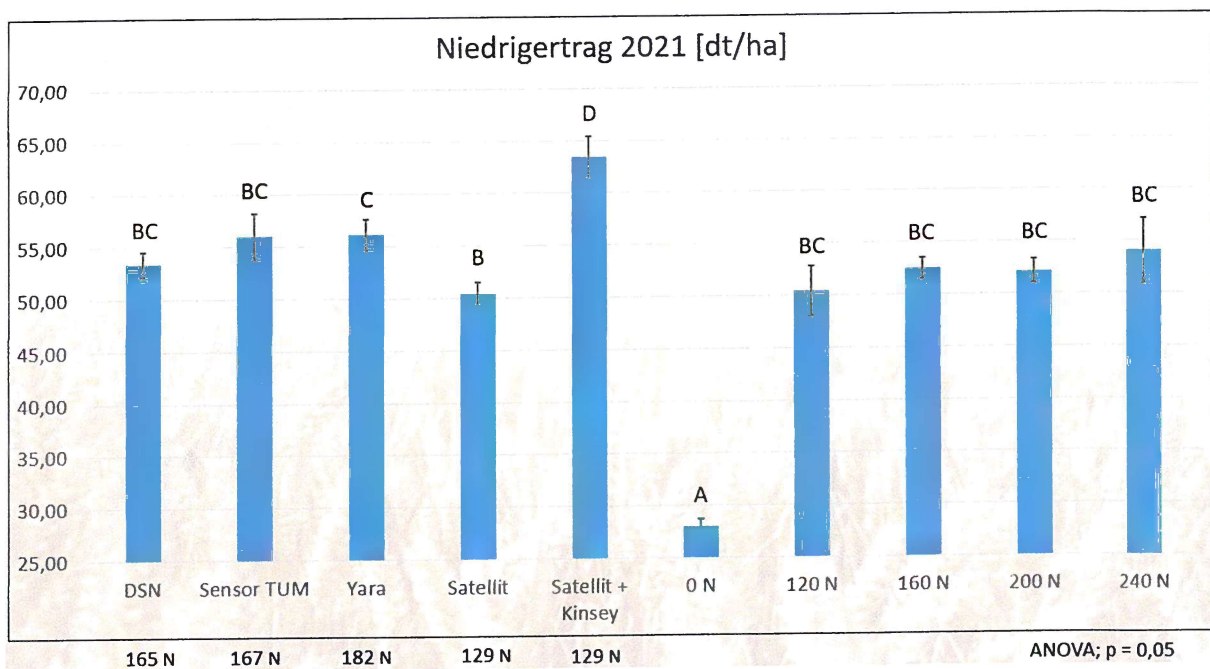


Abbildung 9: Erzielter Weizenertrag in dt/ha (86 % TM) im Niedrigertragsbereich nach Anwendung der einzelnen Düngesysteme mit Angabe der gesamten applizierten N-Menge (dargestellt sind Mittelwerte und Standardfehler, n=4)

Die Ergebnisse zeigen Mehrerträge von 10,9 bis 13,5 dt/ha durch die Anwendung der Albrecht/Kinsey-Empfehlung zwischen Variante Satellit und Satellit + Kinsey. Gleichzeitig fällt jedoch auf, dass die Erträge im Allgemeinen für die Region untypisch niedrig sind und die angenommenen Ertragspotentiale nicht erzielt werden konnten. Gründe dafür sind ungünstige Witterungsbedingungen bei der Aussaat im Herbst 2020, während der Vegetationsperiode (Hitzestress) und bei der Ernte (lange

Regenphase), was letztendlich zu deutlichen Ertragsverlusten führte. Besonders die anhaltende Regenphase Ende Juli/Anfang August, durch welche die Ernte stark verzögert wurde, ließ das Hektolitergewicht (ca. 60 kg/hl) stark sinken. Nichtsdestotrotz herrschten diese Bedingungen für alle Versuchsvarianten gleichermaßen und es fällt auf, dass der nach der Variante Satellit + Kinsey gedüngte Weizen mit diesen widrigen Bedingungen wesentlich besser zurechtkam. Diese Zahlen spiegeln sich auch in der Stickstoffeffizienz wider, wie in Abbildung 10 zu sehen ist.

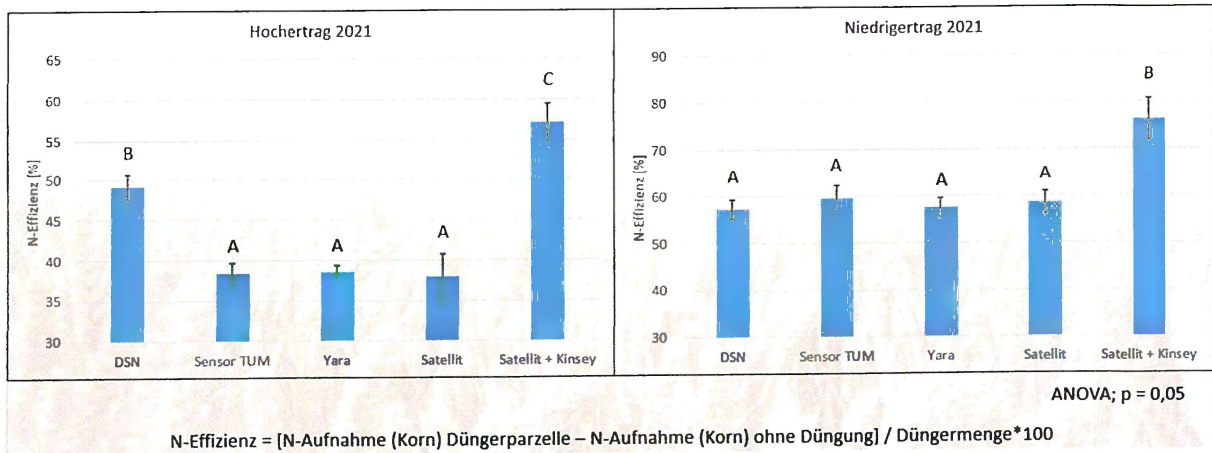


Abbildung 10: Stickstoffeffizienzen der Düngesysteme (dargestellt sind Mittelwerte und Standardfehler, n=4)

### 13.1.3 Versuchsjahr 2022

Nachfolgende Abbildungen (11 bis 13) zeigen die Unterschiede der Erträge aus dem dritten Versuchsjahr 2022 in den einzelnen Ertragsbereichen. Als Ertragspotential, auf welches die Stickstoffdüngesysteme düngten, wurden folgende festgelegt: Hohertrag: 105 dt/ha, Mittlerertrag: 95 dt/ha und Niedrigertrag 85 dt/ha. Die Gesamtmenge in kg N/ha, welche in Summe der drei Düngungsmaßnahmen appliziert wurde, ist zusammen mit der Bezeichnung der Variante unter jedem Balken angegeben.

EIP-Agri Innovationsprojekt: Verbesserung der Stickstoffeffizienz mittels Albrecht-Methode und punktgenauer Bodenanalysen durch satellitengestützte Daten

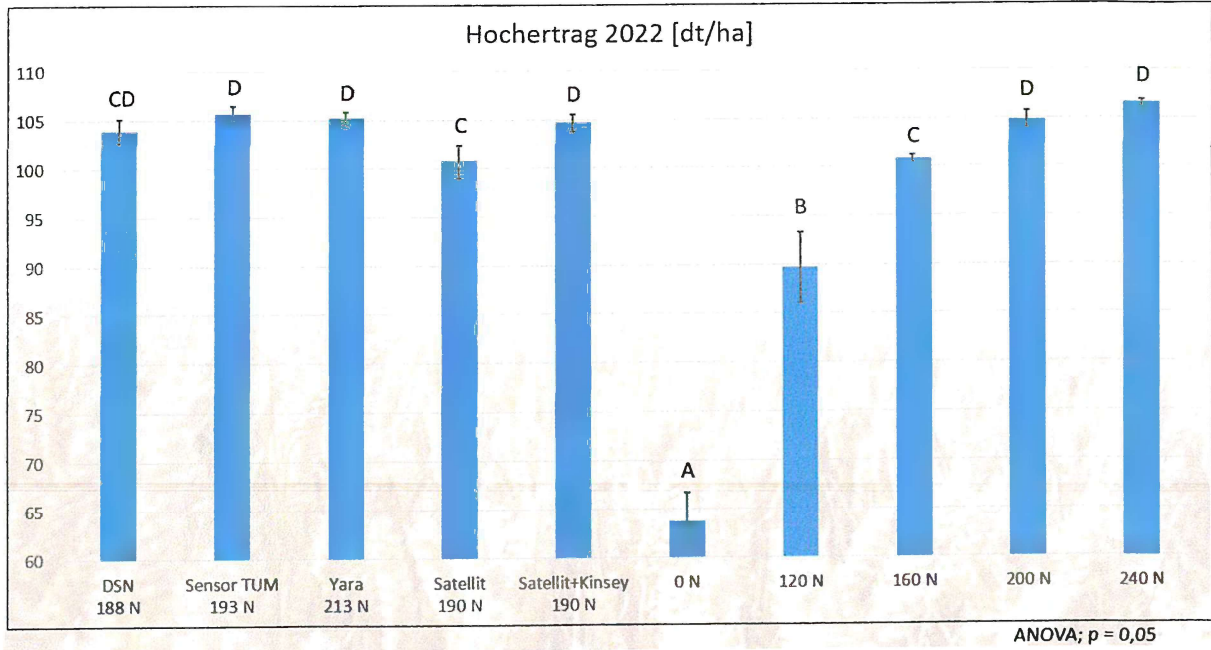


Abbildung 11: Erzielter Weizenenertrag in dt/ha (86 % TM) im Hohertragsbereich nach Anwendung der einzelnen Düngesysteme mit Angabe der gesamten applizierten N-Menge (dargestellt sind Mittelwerte und Standardfehler, n=4)

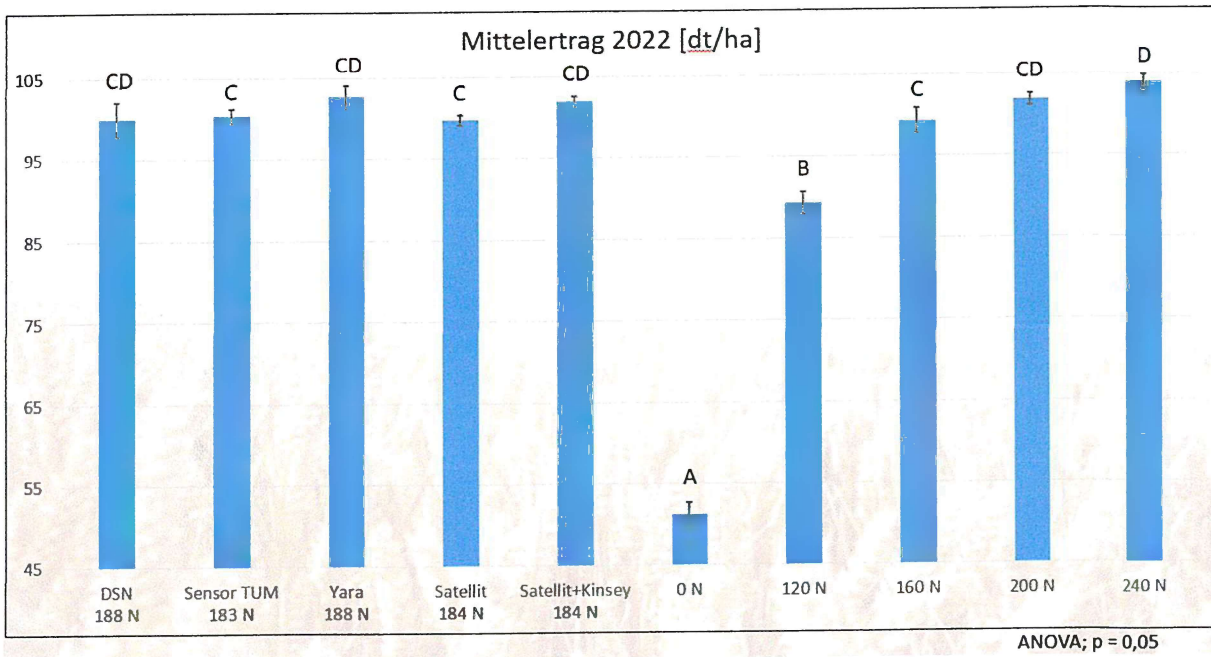


Abbildung 12: Erzielter Weizenenertrag in dt/ha (86 % TM) im Mittlertragsbereich nach Anwendung der einzelnen Düngesysteme mit Angabe der gesamten applizierten N-Menge (dargestellt sind Mittelwerte und Standardfehler, n=4)

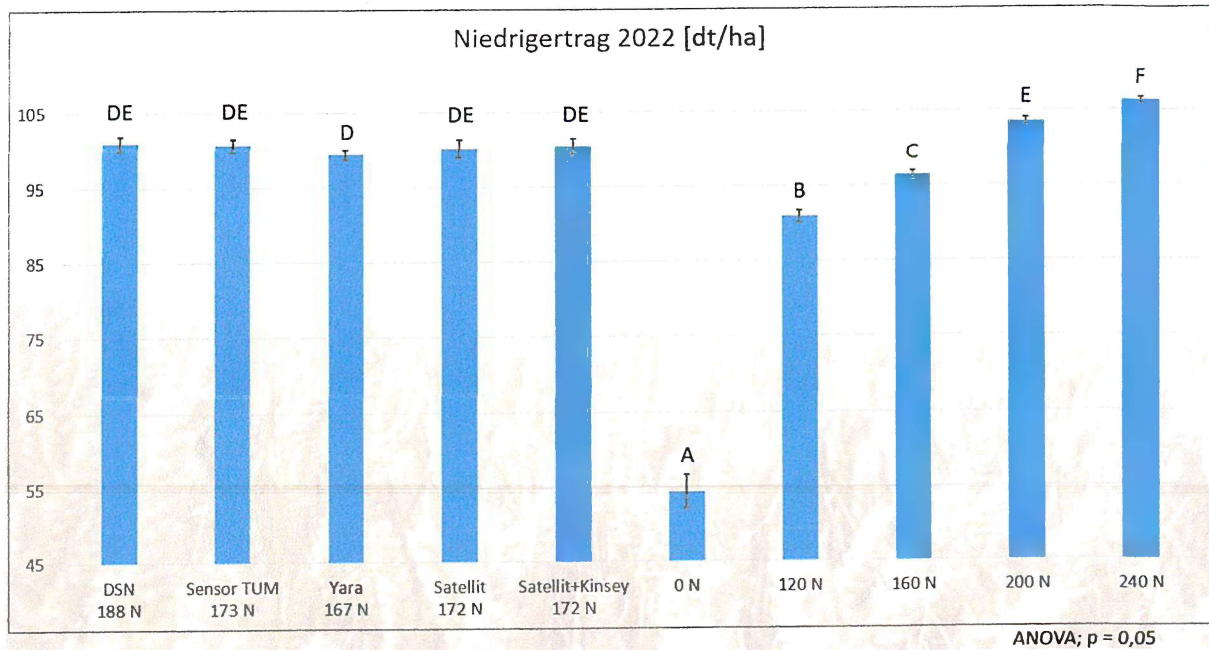


Abbildung 13: Erzielter Weizenantrag in dt/ha (86 % TM) im Niedrigertragsbereich nach Anwendung der einzelnen Düngesysteme mit Angabe der gesamten applizierten N-Menge (dargestellt sind Mittelwerte und Standardfehler, n=4)

Die Ergebnisse zeigen Mehrerträge von 0,3 bis 4,0 dt/ha durch die Anwendung der Albrecht/Kinsey-Empfehlung zwischen Variante Satellit und Satellit + Kinsey. Insgesamt wurden im Jahr 2022 die höchsten Erträge über die gesamte Projektdauer hinweg erzielt und das angenommene Ertragspotential wurde erreicht sowie teilweise sogar übertroffen. In Bezug auf die Stickstoffeffizienz (Abbildung 14) ist nun sowohl im Hoch- als auch Niedrigertrag die Vorzüglichkeit der teilflächenspezifischen Stickstoffausbringung gegenüber der schlageinheitlichen deutlich zu erkennen. Zusammenfassend ist wiederholt ein Verbesserungspotential der Stickstoffeffizienz durch die Anwendung der teilflächenspezifischen Düngung und der Albrecht/Kinsey-Empfehlung zu erkennen.

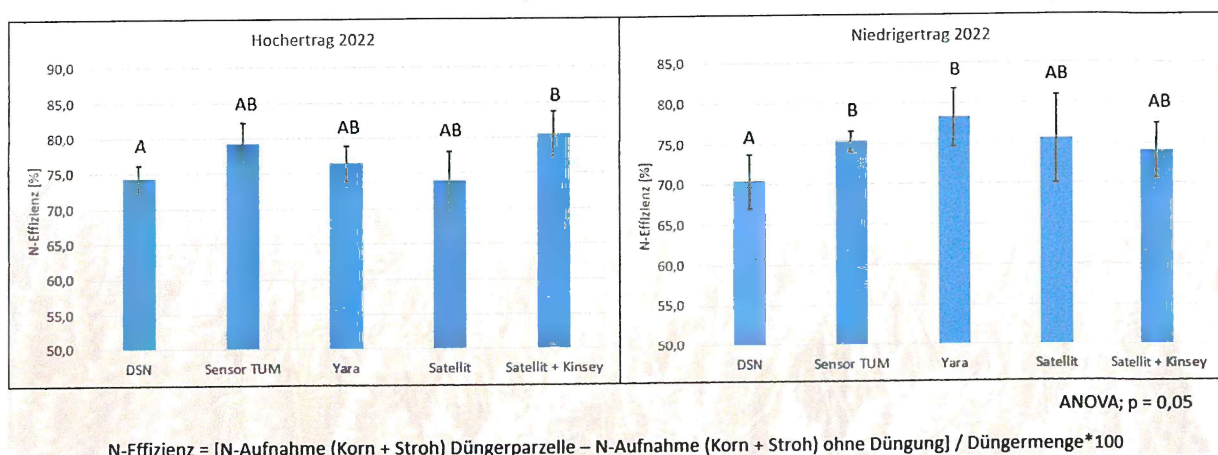


Abbildung 14: Stickstoffeffizienzen der Düngesysteme (dargestellt sind Mittelwerte und Standardfehler, n=4)

### 13.2 Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse dieses Projektes zeigen sehr deutlich, dass es möglich ist durch innovative Düngeverfahren die Stickstoffeffizienz zu verbessern. Besonders erfreulich sind die Ergebnisse des Innovationsansatzes, welcher mögliches Potential zur Optimierung der Stickstoffeffizienz durch die Albrecht/Kinsey-Methode offenbart und so dazu beitragen kann intensive Landwirtschaft mit wichtigen Umweltaspekten besser in Einklang zu bringen. Insbesondere für sensible Regionen, wie Wasserschutz- oder Wassereinzugsgebiete, sind diese Ergebnisse sehr vielversprechend.

Der Vergleich des Innovationsansatzes (ganzheitlichere Betrachtung der Düngung auf Basis einer Albrecht/Kinsey-Empfehlung in Kombination mit teilflächenspezifischer Stickstoffdüngung; Variante 5: Satellit + Kinsey) mit den anderen untersuchten Varianten bringt methodische Herausforderungen mit sich, da zum Teil zwei Variablen (Stickstoffdüngung, Grunddüngung) auf das Ergebnis Einfluss nehmen können. Um diese Schwierigkeit bei der Auswertung umgehen zu können, wurden zwei Varianten (4 + 5) identisch mit Stickstoff versorgt, sodass zwischen Variante 4 und 5 unabhängig von der Stickstoffdüngung der Einfluss der unterschiedlichen Grunddüngung (Albrecht/Kinsey vs. Standard) bewertet werden kann.

Ein weiterer Diskussionspunkt ist die in der Praxis oft übliche Anwendung der sogenannten „Schaukeldüngung“ bei den Grundnährstoffen. So werden Nährstoffe wie beispielweise Kalium, Phosphor, Magnesium oder auch Spurenelemente nach dieser Vorgehensweise nicht gezielt zur jeweiligen Kultur gedüngt, sondern in der Rotation der Fruchtfolge in entsprechender Menge aufgebracht. Um möglichen Verzerrungen der Ergebnisse dadurch vorzubeugen, wurde im Projekt in den jeweiligen Parzellen in Abhängigkeit der entsprechenden Düngeempfehlung (Albrecht/Kinsey vs. Standard basierend auf den gezogenen Bodenproben) gezielt zur Kultur im Versuchsjahr gedüngt. In der Umsetzung bedeutete dies, dass in den Parzellen der Variante 4 (sowie alle anderen außer 5) entsprechend der Empfehlung der Standardbodenuntersuchung gedüngt wurde, während dies in den Parzellen der Variante 5 anhand der Albrecht/Kinsey-Empfehlung getan wurde. So konnte der Effekt der Anwendung der beiden Düngemethoden unmittelbar gegenübergestellt werden. Kam es vor, dass beispielsweise die Albrecht/Kinsey-Empfehlung eine Zink-Düngung empfohlen hatte; nach Standardbodenuntersuchung sich Zink aber in Gehaltsklasse E befand, was bedeutet, dass keine Düngung empfohlen wird, dann wurde dies auch genauso umgesetzt und nur in den Parzellen der Variante 5 eine Zinkdüngung durchgeführt. Diese Tatsache ist auch der wesentliche Unterschied bei der praktischen Umsetzung der beiden Methoden, so kam es des Öfteren vor, dass die Albrecht/Kinsey-Empfehlung eine Düngung für Magnesium, Schwefel, Zink, Bor oder Natrium enthielt, während dies in der Standardbodenuntersuchung nur teilweise oder gar nicht gegeben war.



Bei der Umsetzung der Albrecht/Kinsey-Empfehlung muss allerdings festgehalten werden, dass diese im Projekt als Indikator für mögliche Nährstoffdefizite fungierte, jedoch nicht immer das empfohlene Produkt mit der jeweiligen Aufwandmenge eingesetzt wurde. Dies bedeutet, wenn die Empfehlung eine Maßnahme für einen Nährstoff beinhaltete, so wurde auch agiert, jedoch wurde die Art und Menge (praxisüblich) des Düngerproduktes eigenständig optimal gewählt. Dadurch können in der Praxis beispielsweise Produkte gewählt werden, deren Ausbringung mit vorhandener Technik mit wenig zusätzlichem Aufwand in den Betriebsablauf integriert werden kann. Um beim obigen Beispiel mit dem Zink zu bleiben, so wurde für diese Maßnahme im Projekt ein flüssiger Zinkdünger (Zink-Chelat) verwendet und in reduzierter Menge (500 g Zink verteilt auf 2 Gaben) als Blattapplikation ausgebracht. Dadurch ergibt sich in der Praxis auch die Möglichkeit dies bei einer ohnehin stattfindenden Pflanzenschutzmaßnahme kostengünstig zu ergänzen. Die Empfehlung hätte an dieser Stelle eine Bodendüngung mit 34 kg/ha Zinksulfat (36 %) vorgesehen. Analog wurde diese Vorgehensweise für alle empfohlenen Nährstoffe der Albrecht/Kinsey-Empfehlung angewandt, wodurch ein gewisser Handlungsspielraum für den Anwender gegeben ist. Weiterhin werden auf diese Art nachvollziehbare skeptische Meinungen bezüglich der Vorgabe außergewöhnlicher Düngerprodukte in ungewöhnlich hohen Mengen in Albrecht/Kinsey-Empfehlungen sehr einfach entkräftet. Außerdem ist die Vielfalt landwirtschaftlicher Betriebe sehr groß, sodass nicht jedes Düngerprodukt für jeden Betrieb passend ist, weshalb aus Sicht der OG diese Flexibilität auch ein entscheidender Faktor bei der Nutzung von Albrecht/Kinsey-Empfehlungen ist. Der Landwirt/Anwender darf niemals seinen Handlungsspielraum verlieren und muss stets in der Lage sein, praxisrelevante Anforderungen in seinem Tun berücksichtigen zu können. Dabei ist ein gewisser Interpretationsspielraum des Landwirtes von Nöten, der aber ohnehin bei der Empfehlung der Standardbodenuntersuchung auch notwendig ist, da in diesem Fall auch nur der Bedarf eines Nährstoffes ausgegeben wird. Die Wahl und Aufbringung des Produktes obliegen ebenfalls dem Anwender. Wäre jedoch die Albrecht/Kinsey-Empfehlung erst gar nicht berücksichtigt worden, so wären im Projekt viele Nährstoffe (Schwefel, Zink, Bor, Natrium) nicht zusätzlich gedüngt worden, da nach Standardbodenuntersuchung kein Düngebedarf vorgelegen hätte. Die erzielten Ergebnisse zeigen hingegen eindeutige Effekte der zusätzlichen Maßnahmen in Variante 5, weshalb weitere Überprüfungen dieser Zusammenhänge notwendig und sinnvoll sind. Um einen besseren Überblick über die Umsetzung der Düngung gewinnen zu können, ist diese für den Hohertragsbereich 2022 in Tabelle 3 dargestellt. Grundlage dafür waren Bodenanalysen, die jeweils in den Parzellen gezogen wurden. Die dargestellte Vorgehensweise gilt auch für die weiteren Ertragsbereiche und Versuchsjahre, einzig die absoluten Mengen der einzelnen Nährstoffe bzw. Dünger unterschieden sich geringfügig. Phosphor und Kalium wurden in Folge der Empfehlungen im Versuch nicht gedüngt. Die

Stickstoffdüngung erfolgte über die Stickstoffdüngesysteme, welche in Variante 4 und 5 identisch waren (Vista).

Tabelle 3: Grunddüngung nach Standardbodenuntersuchung bzw. nach Albrecht/Kinsey im Hohertragsbereich 2022

	Standardbodenuntersuchung		Albrecht/Kinsey	
	Empfehlung	Umsetzung	Empfehlung	Umsetzung
<b>S</b>	20 kg S/ha	15 kg S/ha über 1. N-Gabe + 40 kg S/ha aus Kieserit	85 kg/ha ele. Schwefel (90 %)	50 kg/ha ele. Schwefel (90 %) + 15 kg S/ha über 1. N-Gabe + 56 kg S/ha aus Kieserit
<b>Mg</b>	50 kg MgO/ha	50 kg MgO/ha über Kieserit	280 kg/ha Kieserit	280 kg/ha Kieserit
<b>Na</b>	keine Düngung	-	30 kg/ha Natursalz	50 kg/ha Magnesia-Kainit (25 % Na)
<b>Zn</b>	keine Düngung	-	34 kg/ha Zinksulfat (36 %)	2 x 3,2 Liter Zink-Chelat (78 g/l Zn) = 500 g Zink
<b>B</b>	keine Düngung	-	6 kg/ha Borsäure (17 %)	2 x 1,6 Liter Bor 150 (150 g/l B) = 480 g Bor

Ob die generierten Unterschiede und die verbesserte Stickstoffeffizienz zwischen Variante 4 und 5 nun von einzelnen gedüngten Nährstoffen speziell bedingt wurden oder welche Nährstoffe welchen Anteil der Verbesserungen herbeiführten, kann nicht endgültig beurteilt werden, da die Empfehlungen immer in ihrer Gesamtheit umgesetzt wurden, sodass die Vorgehensweise an dieser Stelle beschränkt ist. Daher wäre es aus Gründen der Objektivität und der guten wissenschaftlichen Praxis, aufbauend auf diese durchweg positiven Ergebnisse, sehr sinnvoll weitere Versuche durchzuführen, um zu überprüfen, ob sich dieser Trend auch an anderen Standorten und in weiteren ackerbaulichen Kulturen wiederholt feststellen lässt. Mit den vorliegenden Ergebnissen mit einem Mehrertrag von 6 dt/ha und einer Verbesserung der Stickstoffeffizienz von rund 9 % im Durchschnitt der drei Versuchsjahre (vgl. Kapitel 13.3) durch die Anwendung der Albrecht/Kinsey-Methode bei identischer Stickstoffdüngung, lassen sich die pauschal ablehnenden Meinungen vergangener Jahre zur Albrecht/Kinsey-Methode nur bedingt nachvollziehen (WEIDEMANN ET AL. 2020; AGRARHEUTE 2022). Selbstverständlich muss relativiert werden, dass es sich hierbei nur um Daten eines dreijährigen Projektes an einem Standort in der Kultur Winterweizen handelt, jedoch sind diese Ergebnisse äußerst positiv. Deshalb sollten auf jeden Fall Möglichkeiten geschaffen werden, um den Innovationsansatz zukünftig noch näher und intensiver beleuchten zu können und um letztendlich seinen Nutzen langfristig sowie kultur- und standortunabhängig beurteilen zu können. An dieser Stelle wären auch detailliertere ökonomische Betrachtungen der zusätzlichen Kosten (zusätzliche Dünger, Ausbringung, etc.), welche durch die Umsetzung entstehen, sehr wichtig. Schwerpunkt dieses Projektes war die pflanzenbauliche Betrachtung des Innovationsansatzes, dennoch sollen auch ökonomische Aspekte aufgegriffen werden. Tabelle 4 zeigt die durchschnittlichen Mehrerlöse in €/ha durch die erhöhten Weizenerträge der Variante 5 gegenüber Variante 4 für zwei verschiedene Weizenpreisniveaus.

Tabelle 4: Durchschnittliche Mehrerlöse in €/ha der Variante 5 gegenüber Variante 4 durch die erhöhten Weizenerträge bei einem Verkaufspreis von 20 €/dt und 30€/dt

Jahr	20 €/dt	30 €/dt
2020	60,5	90,7
2021	249,0	373,4
2022	42,9	64,4
Ø	117,5	176,2

Demgegenüber standen durchschnittlich rund 120 €/ha zusätzliche Düngekosten, welche bei einem Weizenpreis ab 20 €/dt im Schnitt der Jahre gedeckt waren. Stark schwankende Düngerkosten der vergangenen drei Jahre machten diese Kalkulation jedoch schwierig. Weiterhin stellt sich die wichtige Frage, wie die erzielten positiven Umweltleistungen monetär zu bewerten sind. An der Stelle können beispielsweise in Wasserschutz- bzw. Wassereinzugsgebieten gegebenenfalls auch zusätzliche Bonuszahlungen für verbesserte Stickstoffeffizienz vom Landwirt erzielt werden. Vor diesen Aspekten sollten zu dieser Thematik noch intensivere ökonomische Betrachtungen durchgeführt werden.

Ein letzter Diskussionspunkt ist die Bedeutung der Ausgangsdaten (Zielertrag, Ertragspotential, etc.) für teilflächenspezifische Düngesysteme. Die Projektergebnisse zeigen was passieren kann, wenn beispielsweise das im Düngesystem angegebene Ertragspotential nicht erreicht wird. So führte diese Tatsache v.a. bei den Sensorsystemen im Jahr 2020 im Hohertragsbereich zu schlechten Stickstoffeffizienzen. Daher muss bei der Anwendung teilflächenspezifischer Düngesysteme das Bewusstsein geschaffen werden, dass die Genauigkeit der Eingabedaten eine sehr wesentliche Rolle beim erfolgreichen Einsatz der Systeme einnimmt und bei Fehleinschätzung auch entsprechende Nachteile auftreten können (DUAN ET AL. 2019; HUNT ET AL. 2019).

### 13.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass die teilflächenspezifische Stickstoffdüngung ihren Beitrag zur Verbesserung der Stickstoffeffizienz klar unter Beweis gestellt hat und die Kombination mit einer Grunddüngung nach Albrecht/Kinsey (Innovationsansatz) sehr positive Daten lieferte. Im Durchschnitt der drei Versuchsjahre konnte durch den Innovationsansatz bei gleicher Stickstoffdüngung der Weizenertrag um rund 6 dt/ha gesteigert (Abbildung 15) und die Stickstoffeffizienz um rund 9 % verbessert (Abbildung 16) werden. Dies sind vielversprechende Resultate für die landwirtschaftliche Praxis, die einen alternativen Lösungsweg im Bereich des bestehenden Interessenskonfliktes bei der Düngung aufzeigen und weitere Untersuchungen dazu rechtfertigen, welche auf Grund der Komplexität der Zusammenhänge in Form von weiteren Feldversuchen und ökonomischen Betrachtungen gemacht werden sollten.

Jahr	Bereich	Düngung (kg N/ha)	Ertrag		Marktleistung	
			Diff (+) (dt/ha)	20 €/dt	30 €/dt	
2020	HE	158	2,8	56,6	84,8	
2020	ME	164	4,7	94,4	141,6	
2020	NE	138	1,5	30,5	45,8	
2021	HE	175	13,5	269,7	404,5	
2021	ME	160	10,9	218,3	327,5	
2021	NE	129	12,9	258,9	388,4	
2022	HE	190	4,0	79,5	119,3	
2022	ME	184	2,2	43,6	65,4	
2022	NE	172	0,3	5,7	8,5	
<b>Durchschnitt</b>			<b>6</b>	<b>117</b>	<b>176</b>	

Abbildung 15: Ertragsunterschiede durch die Anwendung der Albrecht/Kinsey-Empfehlung bei gleicher N-Düngung

Jahr	Bereich	Düngung (kg N/ha)	N-Effizienz
			Diff (%)
2020	HE	158	13,2
2020	ME	164	4,0
2020	NE	138	2,3
2021	HE	175	7,5
2021	ME	160	23,4
2021	NE	129	17,6
2022	HE	190	6,7
2022	ME	184	3,4
2022	NE	172	-1,5
<b>Durchschnitt</b>			<b>9</b>

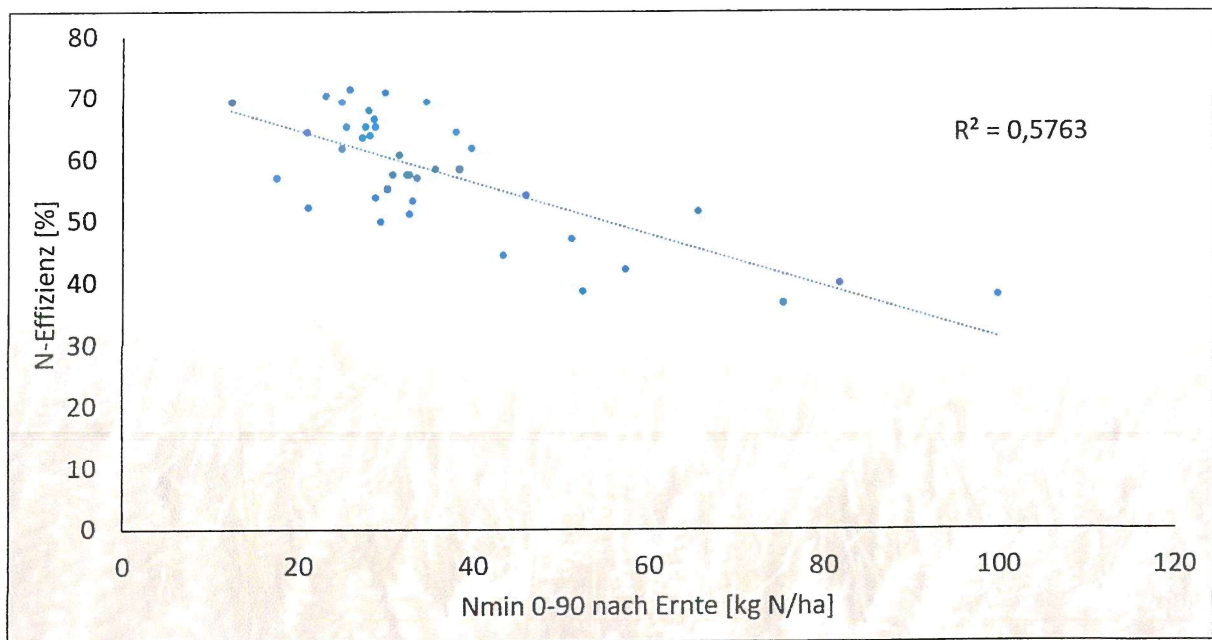
Abbildung 16: Unterschiede bei der N-Effizienz durch die Anwendung der Albrecht/Kinsey-Empfehlung bei gleicher N-Düngung

## 14. Verwertung der Ergebnisse

### 14.1 Zielerreichung

Die Zielsetzung des Projektes wurde vollends erreicht. So konnte klar aufgezeigt werden, dass durch die Kombination bestehender teilflächenspezifischer Düngesysteme und einer Düngeempfehlung nach der Albrecht/Kinsey-Methode anhand satellitendatenbasierter Bodenproben Potential zur Verbesserung der Stickstoffeffizienz besteht. Selbstverständlich sind bei solch einem komplexen Thema weitere Untersuchungen notwendig, jedoch rechtfertigen die Erkenntnisse dieses Projektes, dass es absolut sinnvoll ist diesen Weg zu gehen und sich mit der Thematik noch detaillierter und großräumiger auseinanderzusetzen.

Ein äußerst spannendes Nebenergebnis stellt die Tatsache dar, welche große Stickstoffpufferfunktion eine Zwischenfrucht im Herbst/Winter einnehmen kann und so ebenfalls aktiv zur Verbesserung der Stickstoffeffizienz beitragen kann. So haben die N-min Untersuchungen nach der Ernte und zu Beginn der Auswaschungsperiode im November ergeben, dass durch die Zwischenfrucht hohe N-min-Gehalte nach der Ernte problemlos abgepuffert werden können und dies sogar trotz Düngung (50 kg N/ha aus Biogasgülle) der Zwischenfrucht, was in Zusammenhang mit der Düngeverordnung sehr kritisch eingestuft wird. So ist in roten Gebieten eine Düngung der Zwischenfrucht mittlerweile nicht mehr erlaubt, was aus fachlicher Sicht durchaus zu hinterfragen ist. Die Versuche ergaben, dass eine gut etablierte gedüngte Zwischenfrucht in der Lage ist hohe N-min-Gehalte von bis zu 100 kg N/ha (0-90 cm) zum Zeitpunkt der Weizenernte bis zum Beginn der Auswaschungsperiode im Herbst entsprechend aufzunehmen und abzupuffern, wodurch die Gefahr der Nitratauswaschung während der Wintermonate deutlich reduziert wird. So wurden nach der Ernte der Versuche N-min-Werte von 20 kg N/ha bis knapp 100 kg N/ha (0-90 cm) festgestellt. Im Anschluss wurde die Bodenbearbeitung durchgeführt, Gülle ausgebracht und die Zwischenfrucht gesät. Bei der N-min-Beprobung im Herbst konnten dann keine Unterschiede mehr festgestellt werden und die N-min-Werte bewegten sich alle gleichmäßig auf niedrigerem Niveau von +/- 20 kg N/ha (0-90 cm). Der Biomassertrag des Zwischenfruchtbestandes wurde zwar nicht beprobt, jedoch waren die Unterschiede deutlich zu erkennen. Dies zeigt auf, wie wichtig der erfolgreiche Zwischenfruchtanbau für den Grundwasserschutz ist, sodass die dafür nötigen Rahmenbedingungen langfristig dringend wieder besser erhalten bzw. geschaffen werden sollten. Abbildung 17 zeigt den eindeutigen Zusammenhang zwischen Stickstoffeffizienz der Düngung und der Nitratrückstände im Boden nach der Ernte.



$$\text{N-Effizienz} = [\text{N-Aufnahme (Korn + Stroh) Düngerparzelle} - \text{N-Aufnahme (Korn + Stroh) ohne Düngung}] / \text{Düngermenge} * 100$$

Abbildung 17: Lineare Korrelation zwischen Stickstoffeffizienz und N-min-Gehalt (0-90 cm) nach der Ernte der Versuchspartzellen

#### 14.2 Nutzen für die Praxis und (geplante) Verwertung

Anhand der Erkenntnisse dieses Projektes sind nutzbare Empfehlungen bzw. ein verwertbares Verfahren entstanden. Diese Ergebnisse werden bereits in der Praxis genutzt. Bekannte Nutzer sind zwei Wasserschutzverbände und mehrere private Landwirte in Deutschland sowie im europäischen Ausland (Österreich, Ungarn und Rumänien). Auf Grund der regen Kontaktaufnahme vieler Landwirte, die Interesse am durchgeführten EIP-Projekt und den generierten Erkenntnissen bekunden, ist von einer steigenden Zahl an Praxisnutzern auszugehen. Weiterhin ist geplant die Ergebnisse an zukünftigen Feldtagen und Vortragsveranstaltungen weiter zu kommunizieren. Ebenfalls hat es sich die OG zum Ziel gemacht, die gewonnenen Erkenntnisse in einem Folgeprojekt weiter zu intensivieren und auszuweiten.

#### 14.3 Beitrag der Ergebnisse zu förderpolitischen EIP-Zielen

Das Hauptziel der Europäischen Innovationspartnerschaft für landwirtschaftliche Produktivität und Nachhaltigkeit (EIP-Agri) ist es, Innovationen in den Sektoren Agrar und Forst zu fördern. Im Detail soll durch praxis- und zukunftsorientierte Vorhaben zur Verbesserung der Produktivität und Nachhaltigkeit im Land-, Forst- und Ernährungsbereich beigetragen werden, um Ressourcen zu schonen.

Der Innovationsansatz stellt auf jeden Fall einen Beitrag zur Erreichung dieser Ziele dar. So wird durch die Verbesserung der Stickstoffeffizienz einerseits die Produktivität erhöht und andererseits können Ressourcen (Stickstoffdünger) eingespart werden. Dadurch können negative Umwelteinflüsse durch Stickstoffverluste reduziert werden und die landwirtschaftliche Produktion kann wesentlich nachhaltiger gestaltet werden. Somit tragen die EIP-Ergebnisse maßgeblich dazu bei, die Produktion hochwertiger Lebensmittel und den Umweltschutz zukünftig besser zu vereinen.

## 15 Wirtschaftliche und wissenschaftliche Anschlussfähigkeit und weiterführende Fragestellungen

Aus den Projektergebnissen ergeben sich einige weitergehende Fragestellungen, die sinnvollerweise zukünftig bearbeitet werden sollten:

- Wie können Düngealgorithmen weniger anfällig gegenüber Fehleinschätzungen (Ertragspotential) des Anwenders gestaltet werden?
- Mit welchen Methoden lässt sich das Ertragspotential noch besser beurteilen?
- Ob und zu welchen Anteilen war die Zugabe der einzelnen Nährstoffe für den Erfolg des Innovationsansatzes verantwortlich?
- Ist die Vermutung richtig, dass der Innovationsansatz auf nicht so ertragsfähigen Standorten, wie im Straubinger Gäuboden, möglicherweise noch deutlichere Effekte erzielen könnte?
- Wie reagieren andere Kulturen, insbesondere ganzheitlich innerhalb einer Fruchtfolge betrachtet auf die Anwendung des Innovationsansatzes?

Diese Aspekte und Fragestellungen können und müssen durch weitere intensive Feldversuche in diversen ackerbaulichen Kulturen und an unterschiedlichen Standorten bearbeitet werden. Das in diesem Projekt angewandte und erarbeitete Konzept bietet eine gute Grundlage zur Planung weiterer Folgeprojekte. Eine weitere gute Möglichkeit würde ein Langzeit-Fruchtfolgeversuch darstellen. Dadurch könnte auch der Langzeit-Effekt der Albrecht/Kinsey-Düngung besser beurteilt und v.a. ökonomisch innerhalb der Fruchtfolge gut bewertet werden.

## 16 Kommunikations- und Disseminationskonzept

Der Transfer der Ergebnisse in die landwirtschaftliche Praxis erfolgte über verschiedene Wege und Kanäle. Zum einen wurden zahlreiche Veranstaltungen besucht, auf welchen in Vorträgen über das Projekt und seine Ergebnisse informiert wurde, zum anderen wurden diverse Veranstaltungen und Versuchsführungen organisiert, bei denen sich interessierte Landwirte vor Ort informieren und ein Bild von den Feldversuchen machen konnten. Weiterhin wurden schriftliche Beiträge in

Fachzeitschriften/Journals (national und international) verfasst sowie ein Kurzvideo in Zusammenarbeit mit der Deutschen Vernetzungsstelle Ländliche Räume gedreht, welches über die sozialen Medien verbreitet wurde (zu finden auf dem YouTube-Kanal „DVS Ländliche Räume“ unter dem Titel „Optimierung der Stickstoffeffizienz“ oder über nachstehenden Link: [Optimierung der Stickstoffeffizienz - YouTube](#)). Hierfür möchte sich die OG Düngoptimierung Niederbayern an dieser Stelle nochmals ganz herzlich bedanken. Besondere Highlights beim Wissenstransfer in die Praxis waren die Vorstellung des Projektes am Stand der DVS an den DLG-Feldtagen, ein Praxistag mit höchstinteressierten Schülern der HLS Rotthalmünster und natürlich der abschließende Ergebnisworkshop im März 2023.



## Literaturverzeichnis

- Agrarheute (2022): Bodenuntersuchung: Das leistet die Albrecht-Kinsey-Analyse. Online verfügbar: <https://www.agrarheute.com/pflanze/bodenuntersuchung-leistet-albrecht-kinsey-analyse-589799> (aufgerufen am 24.05.2023).
- Argento, F., Anken, T., Abt, F., Vogelsanger, E., Walter, A., Liebisch, F. (2021): Site-specific nitrogen management in winter wheat supported by low-altitude remote sensing and soil data. *Precision Agriculture* 22(2), 364–386.
- Baumgärtel, G. (2012): Stickstoffeffizienz im Ackerbau weiter steigern-Möglichkeiten und Grenzen. 21. *Thüringer Düngungs- und Pflanzenschutztagung*, 34–43.
- Boogaard, H., Wolf, J., Supit, I., Niemeier, S., van Ittersum, M. (2013): A regional implementation of WOFOST for calculating yield gaps of autumn-sown wheat across the European Union. *Field Crops Research* 143, 130–142.
- Döös, B. R. (2002): Population growth and loss of arable land. *Global Environmental Change* 12(4), 303–311.
- Duan, J., Shao, Y., He, L., Li, X., Hou, G., Li, S., Feng, W., Zhu, Y., Wang, Y., Xie, Y. (2019): Optimizing nitrogen management to achieve high yield, high nitrogen efficiency and low nitrogen emission in winter wheat. *Sci. Total Environ.* 697, 134088.
- Ferreira, I. E., Zocchi, S. S., Baron, D. (2017): Reconciling the Mitscherlich's law of diminishing returns with Liebig's law of the minimum. Some results on crop modeling. *Mathematical Biosciences* 293, 29–37.
- Fölsch, M., Otter-Nacke, S. (2010): Mehr Präzision bei der Grunddüngung. *Precision Agriculture Reloaded—Informationsgestützte Landwirtschaft*.
- Hunt, M.L., Blackburn, G.A., Carrasco, L., Redhead, J.W., Rowland, C.S. (2019): High resolution wheat yield mapping using Sentinel-2. *Remote Sens. Environ.* 233, 111410.
- Lanzer, E. A., Paris, Q. (1981): A new analytical framework for the fertilization problem. *American Journal of Agricultural Economics* 63(1), 93–103.
- Liu, H., Whiting, M. L., Ustin, S. L., Zarco-Tejada, P. J., Huffman, T., Zhang, X. (2018): Maximizing the relationship of yield to site-specific management zones with object-oriented segmentation of hyperspectral images. *Precision agriculture* 19(2), 348–364.
- Maidl, F. X., Sticksel, E., Retzer, F., Fischbeck, G. (1998): Effect of varied N-fertilization on yield formation of winter wheat under particular consideration of mainstems and tillers. *Journal of Agronomy and Crop Science* 180(1), 15–22.
- Maidl, F. X., Schächtl, J., Huber, G. (2004): Strategies for site-specific nitrogen fertilization on winter wheat. In *Proceedings of the 7th International Conference on Precision Agriculture and Other Precision Resources Management, Hyatt Regency, Minneapolis, MN, USA* (pp. 1938–1948). Precision Agriculture Center, Minnesota, USA.
- Mohammed, Y. A., Kelly, J., Chim, B. K., Rutto, E., Waldschmidt, K., Mullock, J., Torres, G., Desta, K. G., Raun, W. (2013): Nitrogen fertilizer management for improved grain quality and yield in winter wheat in Oklahoma. *Journal of plant nutrition* 36(5), 749–761.

- Mulla, D. J. (2013): Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems engineering* 114(4), 358–371.
- Prücklmaier, J. (2020): Feldexperimentelle Analysen zur Ertragsbildung und Stickstoffeffizienz bei organisch-mineralischer Düngung auf heterogenen Standorten und Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung durch computer- und sensorgestützte Düngesysteme (Field Experimental Analyses of Yield Effects and Nitrogen Efficiency of Fertilizer Application Systems). Doctoral dissertation. Technische Universität München, Weihenstephan. Organic Agriculture and Agronomy.
- Schmidhalter, U. (2014). Sensorgestützte Ermittlung des Nährstoffbedarfs. VDLUFA-Schriftenreihe 70, Kongressband 2014, p. 57-66, Hohenheim.
- Schuster, J., Mittermayer, M., Maidl, F. X., Nätscher, L., Hülsbergen, K. J. (2022): Spatial variability of soil properties, nitrogen balance and nitrate leaching using digital methods on heterogeneous arable fields in southern Germany. *Precision Agriculture*, 1–30.
- Statistisches Bundesamt (2022): Destatis - Wachstum und Ernte - Feldfrüchte 2021. Online verfügbar: [https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Feldfruechte-Gruenland/Publikationen/Downloads-Feldfruechte/feldfruechte-jahr-2030321217164.pdf;jsessionid=782D75005809F0A555867381E127195E.live731?\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Feldfruechte-Gruenland/Publikationen/Downloads-Feldfruechte/feldfruechte-jahr-2030321217164.pdf;jsessionid=782D75005809F0A555867381E127195E.live731?_blob=publicationFile) (aufgerufen am 18. April 2023).
- Svoboda, N., Strer, M., Hufnagel, J. (2015): Rainfed winter wheat cultivation in the North German Plain will be water limited under climate change until 2070. *Environmental Sciences Europe* 27(1), 1–7.
- Waggoner, P. E., Norvell, W. A. (1979): Fitting the Law of the Minimum to Fertilizer Applications and Crop Yields. *Agronomy Journal* 71(2), 352–354.
- Wagner, P., Marz, M. (2017): Precision Farming–Langzeitversuche mit Grunddüngungsstrategien. *Informatik in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft 2017*.
- Weckesser, F., Leßke, F., Luthardt, M., Hülsbergen, K. J. (2021): Conceptual Design of a Comprehensive Farm Nitrogen Management System. *Agronomy* 11(12), 2501.
- Weidemann, C., Mühling, K. H., Biernat, L. (2020): Welche Methode für die Bodenanalyse? *Getreidemagazin* 3(20), 14–17.