

Optimierung der Stickstoffdüngung unter Klima-, Ertrags- und Qualitätsgesichtspunkten

Prof. Dr. Henning Kage

Institut für Pflanzenbau & Pflanzenzüchtung
Christian-Albrechts-Universität Kiel





Berichte über Landwirtschaft

Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft

Aktuelle Ausgabe Archiv Beitragseinreichung Zur Zeitschrift Mitteilungen Kontakt

Home / Archiv / Band 100, Heft 1, April 2022 / Artikel

Stickstoffdüngung zu Winterraps und Winterweizen

Eine Evaluierung der Düngeverordnung und methodischer Aspekte der Auswertung von Düngeversuchen

Hennig Kage

Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

Thomas Rübiger

Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

Klaus Sieling

Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung Christian-Albrechts-Universität zu Kiel



Veröffentlicht

2022-04-08

Ausgabe

Band 100, Heft 1, April 2022

DOI:

<https://doi.org/10.12767/buel.v100i1.415>

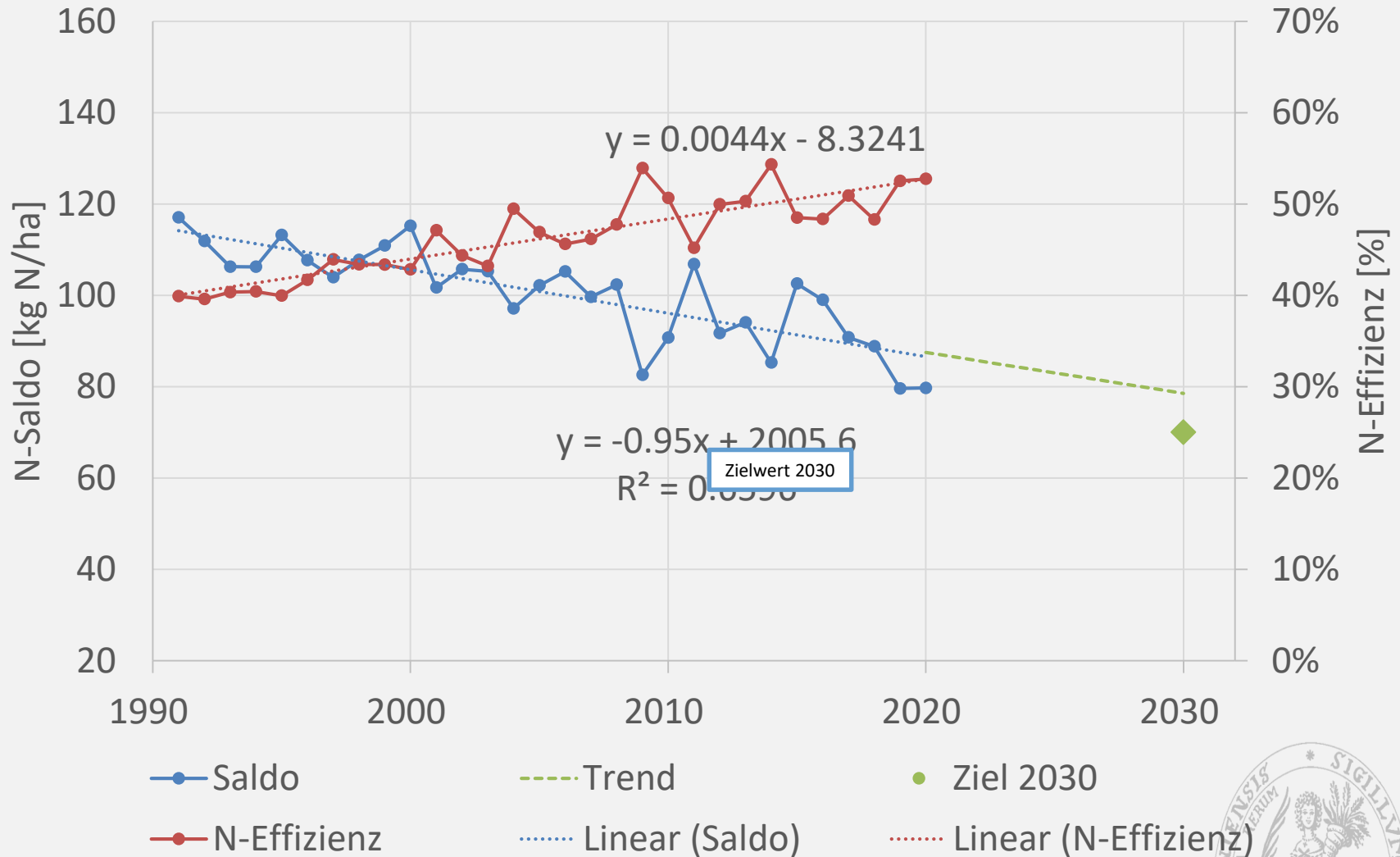


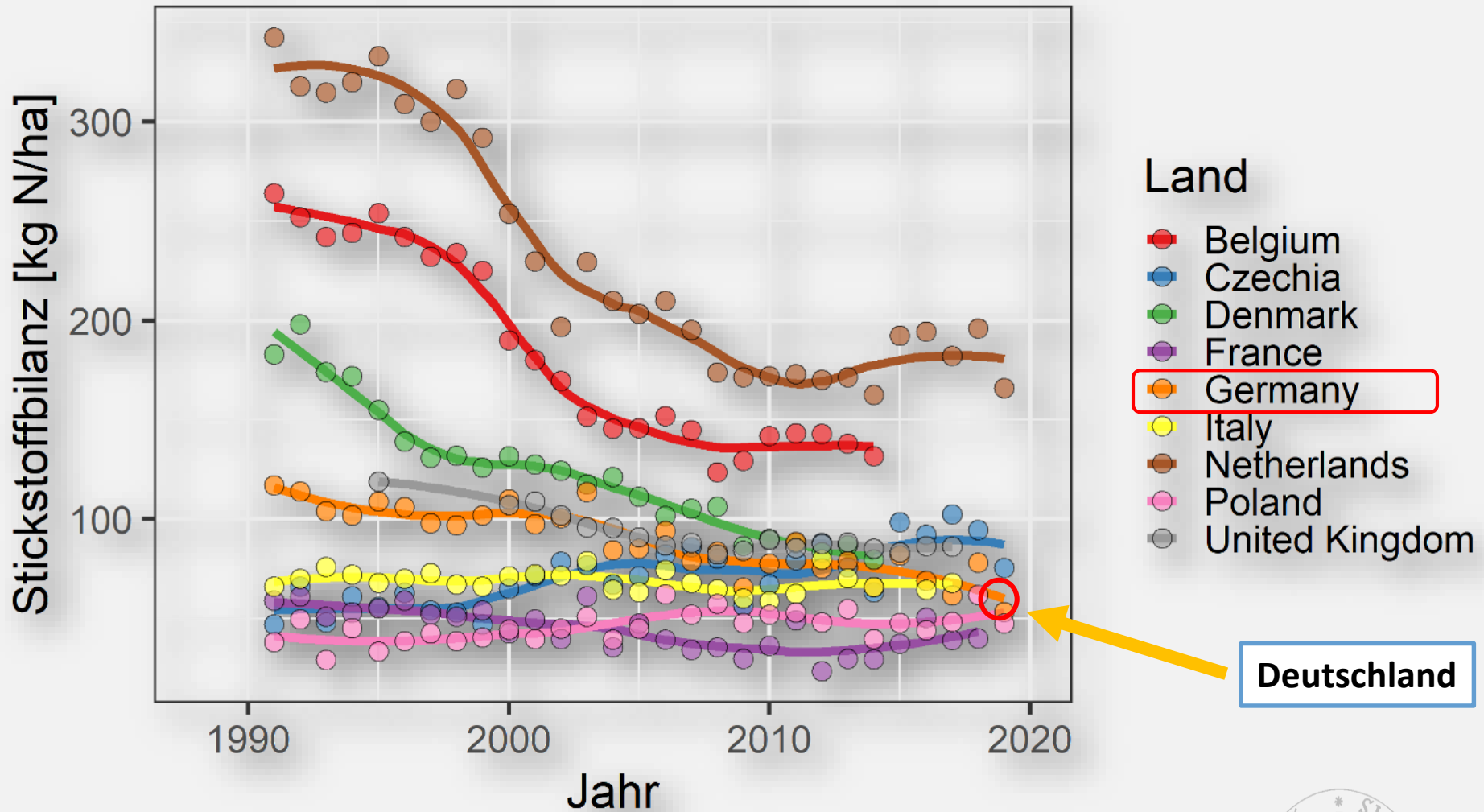
Gliederung

- **Problemstellung**
 - Stickstoff, Grundwasser, Klima
- **Evaluierung DüV**
 - Weizen/Raps
- **Stickstoffdüngung und Klima**
- **Stellungnahme Taube?**



Entwicklung der Brutto-N-Bilanz und N-Effizienz des Sektors Landwirtschaft 1991-2020 (Gesamtbilanz Deutschland)

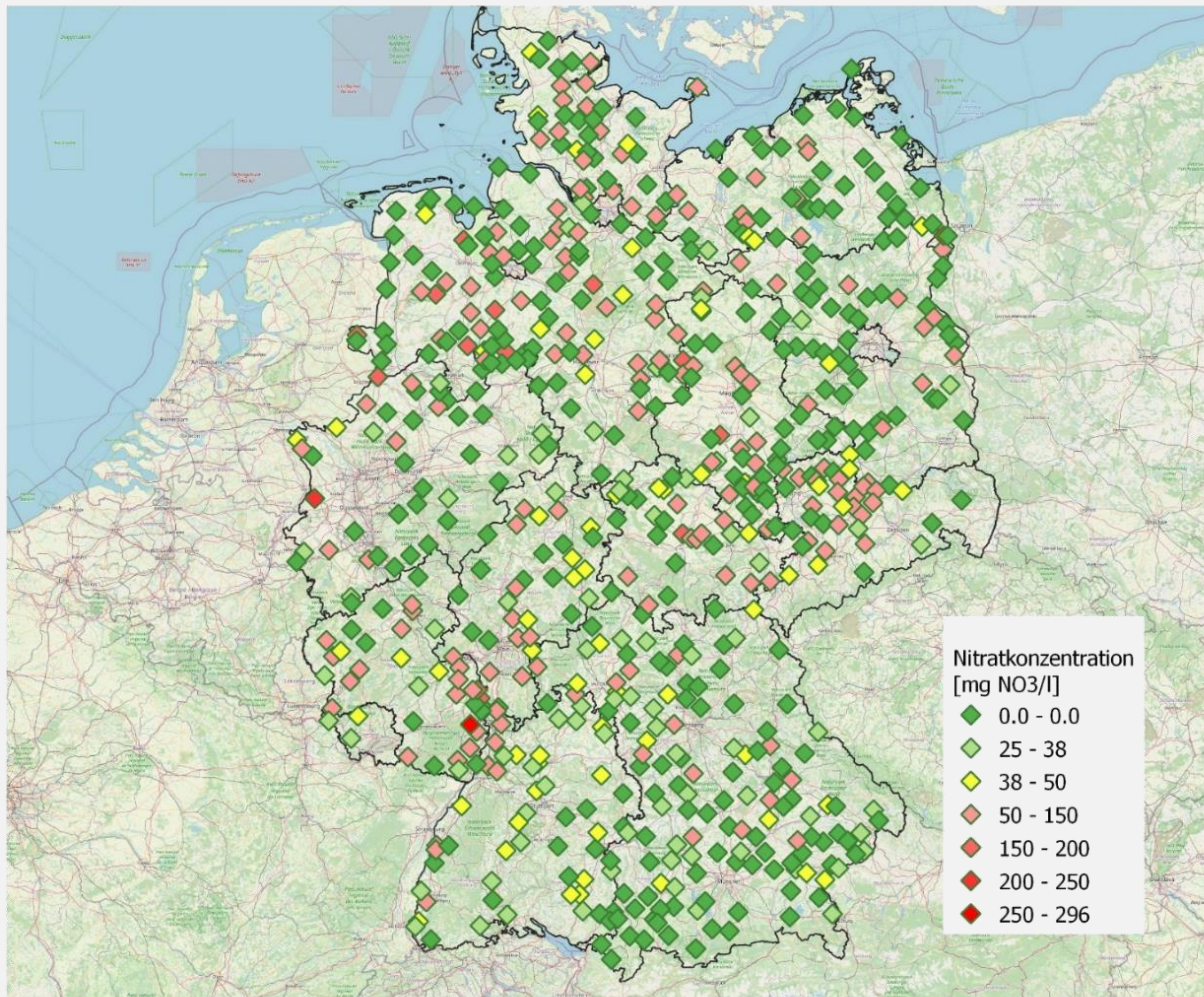




Neueste Zahlen aus 2019!



Neues „repräsentatives“ EU-Messnetz 2018 (Teilmenge des EUA-Messnetzes)



Deutschland

- 664 Messstellen
- 530 km²/Messstelle
- Ø 37 mg NO₃/l
(Median 24 mg NO₃/l)

Dänemark

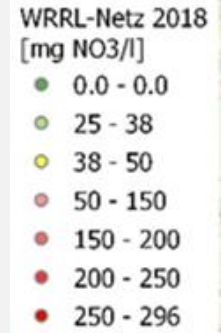
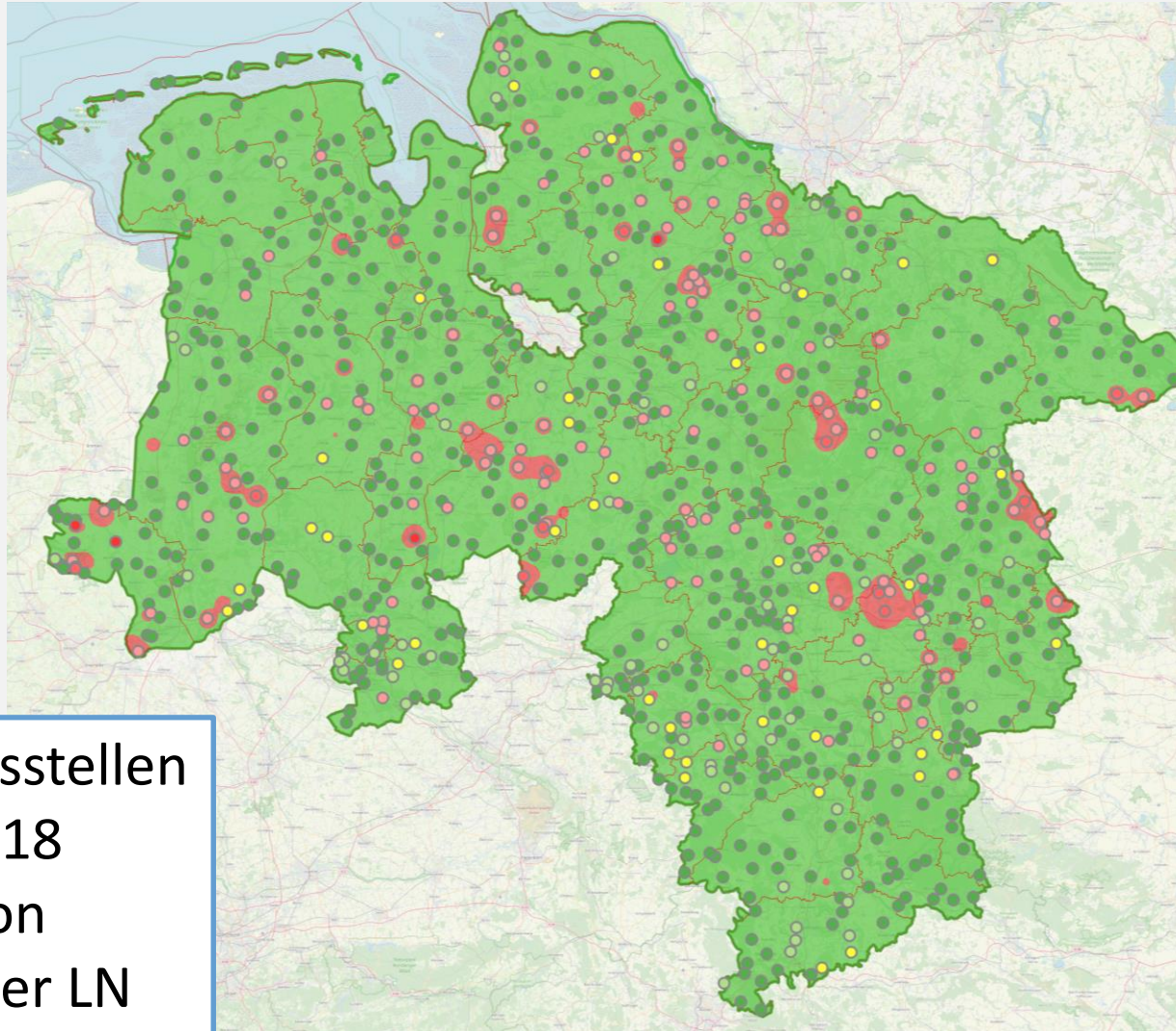
- 883 Messstellen
- 49 km²/Messstelle
- Ø 28 mg NO₃/l
(Median 17 mg NO₃/l)

Niedersachsen (WRRL-Netz)

- 841 Messstellen unter LN
- 1036 gesamt
- 46 km²/Messstelle
- Ø 28 mg NO₃/l
(Median 2.2 mg NO₃/l)



Karte der WRRL-Messtellen 2018 und IDW-interpolierte Nitratkonzentration (rote Flächen > 50 mg NO₃/l)

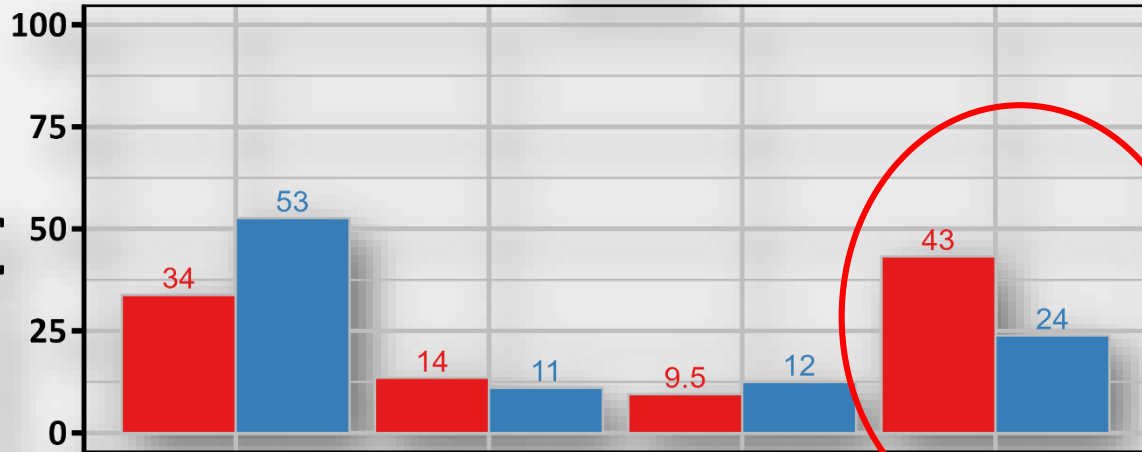


1036 Messstellen
in 2018
davon
841 unter LN

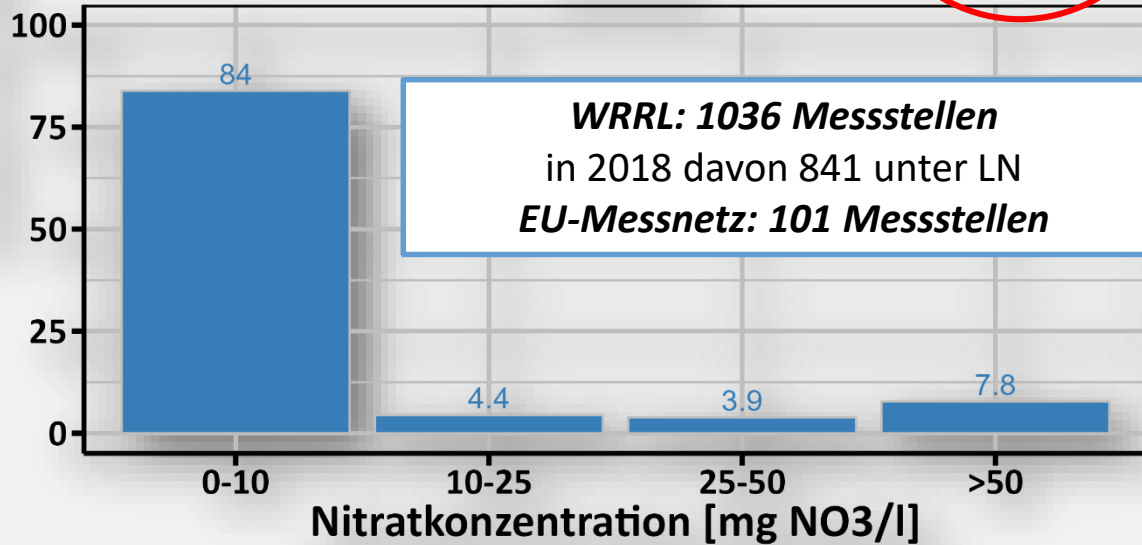


Nitratkonzentration im Grundwasser Niedersachsen 2018 (Letzte verfügbare Werte für EU-Meldung)

Ackerland



Grünland



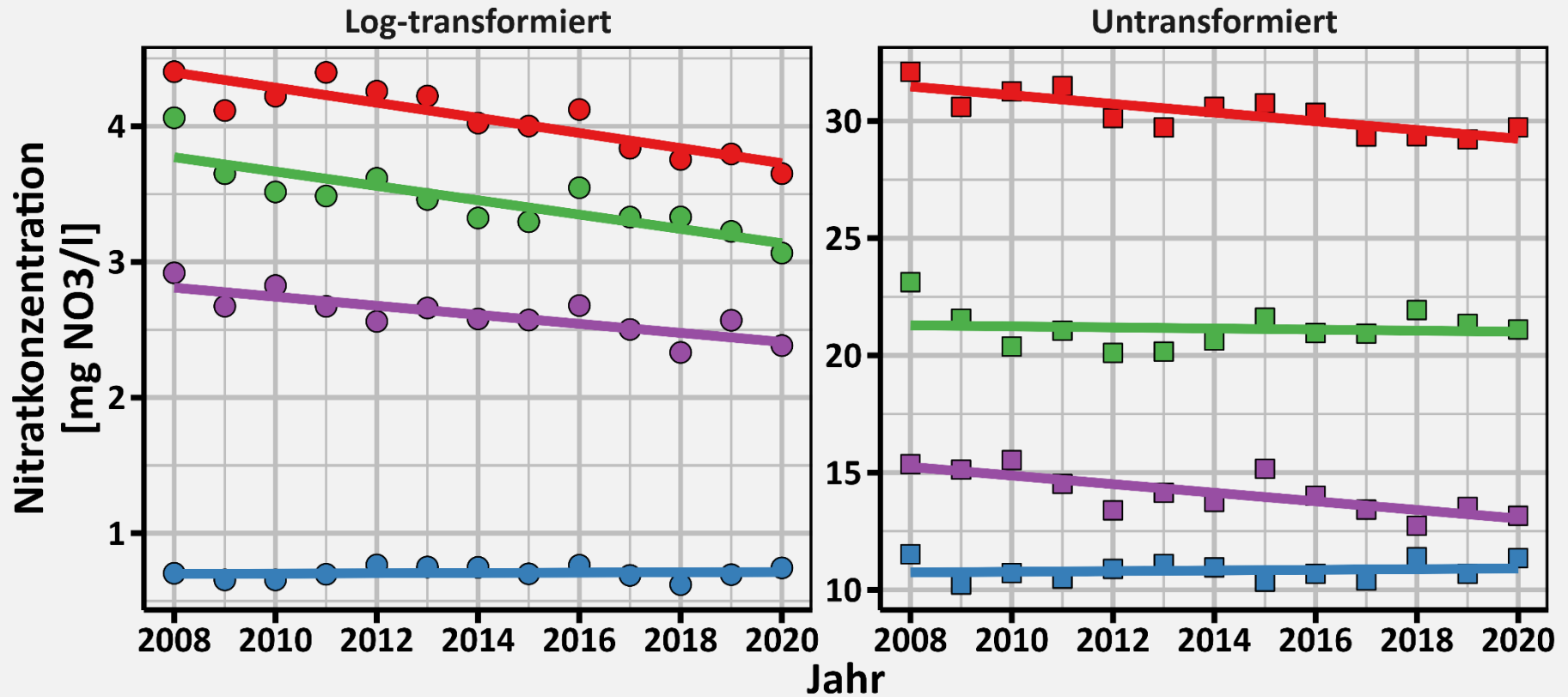
Messnetz ■ Nitratrichtlinie ■ WRRL

Relative Häufigkeit (%) der Nitratkonzentrationen in den Daten des WRRL Messnetzes und der Meldungen für Nitratrichtlinie in Niedersachsen 2018

Nicht repräsentative Meldung der Nitratkonzentrationen im Rahmen der Nitratrichtlinie auch im „angepassten“ Messnetz, welches kein Belastungsmessnetz mehr darstellen soll!



Trends der Nitratkonzentration im WRRL-Messnetz Niedersachsen



Nutzung ■ Ackerland ■ Gruenland ■ Sonstiges ■ Wald

Modell ○ Log-transformiert □ Untransformiert

Nitratdaten: NLWKN, Zuordnung Nutzung: nach CLC Land use
 Auswertung: Gemischtes Modell mit Messtelle als Random-Faktor, Log-transformiert: Log-transformation der Rohdaten wg. nicht-Normalverteilung + Rücktransformation



Stickstoffsalden & Nitratkonzentration Grundwasser

■ Nitratkonzentrationen (nur) lokal hoch

- Wg. Denitrifikation bisher? oft keine Nitratbelastung
- *Datenlage zur langfristigen Denitrifikationskapazität unzureichend!*

■ Trends

- Sinkend

■ Auch neues EU-Berichtsmessnetz nicht repräsentativ!

- Messstellen mit sehr niedrigen Nitratkonzentrationen unterrepräsentiert
- Gründe?
- EU-Kommission fordert repräsentatives Messnetz



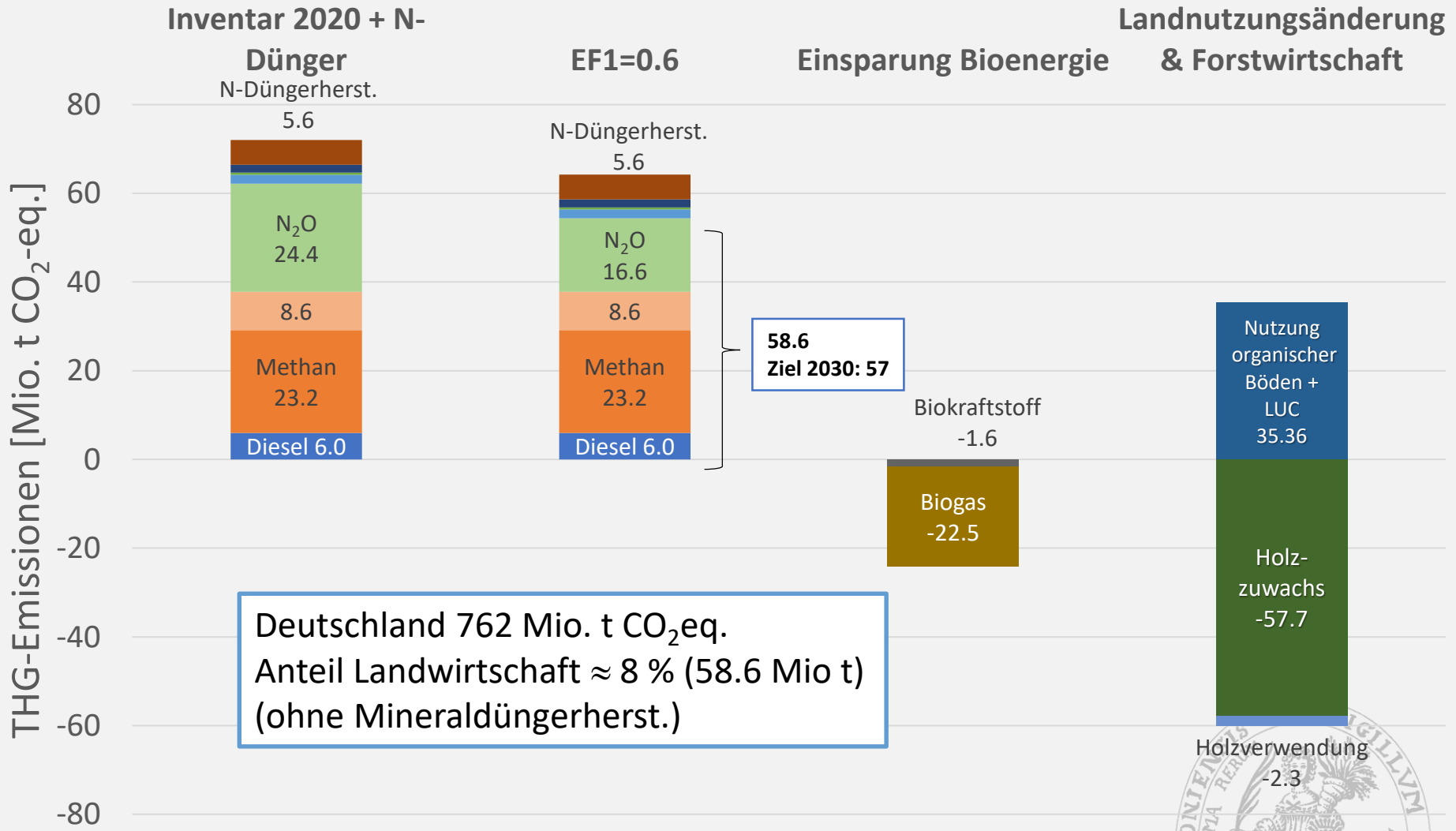
Deutschland soll früher klimaneutral werden

- Treibhausgasemissionen
 - Bis 2030: 65 % weniger CO₂ (bislang 55 %)
 - Bis 2040: 88 % weniger CO₂
 - 2045: Klimaneutralität (bislang 2050)
- Zulässige jährliche CO₂-Emissionsmengen für einzelne Sektoren wie Energiewirtschaft, Industrie, Verkehr oder Gebäudebereich werden abgesenkt.

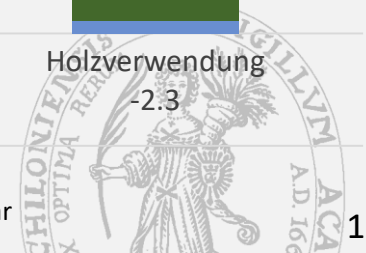


THG-Emissionen

Landwirtschaft, Bioenergie und Forstwirtschaft



Daten: Inventarbericht TI, Herstellungsemissionen N 3.951 kg CO₂eq/kgN, Basisdaten Bioenergie FNR, BMU Inventar



Wo liegt die optimale Stickstoffdüngungsintensität?

■ Kriterien

- Ertrag
- Qualität
- Grundwasserbelastung (Nitratauswaschung)
- Klimaeffekt

■ Voraussetzung für Beurteilung

- Daten
- Schätzmethoden
- Modelle



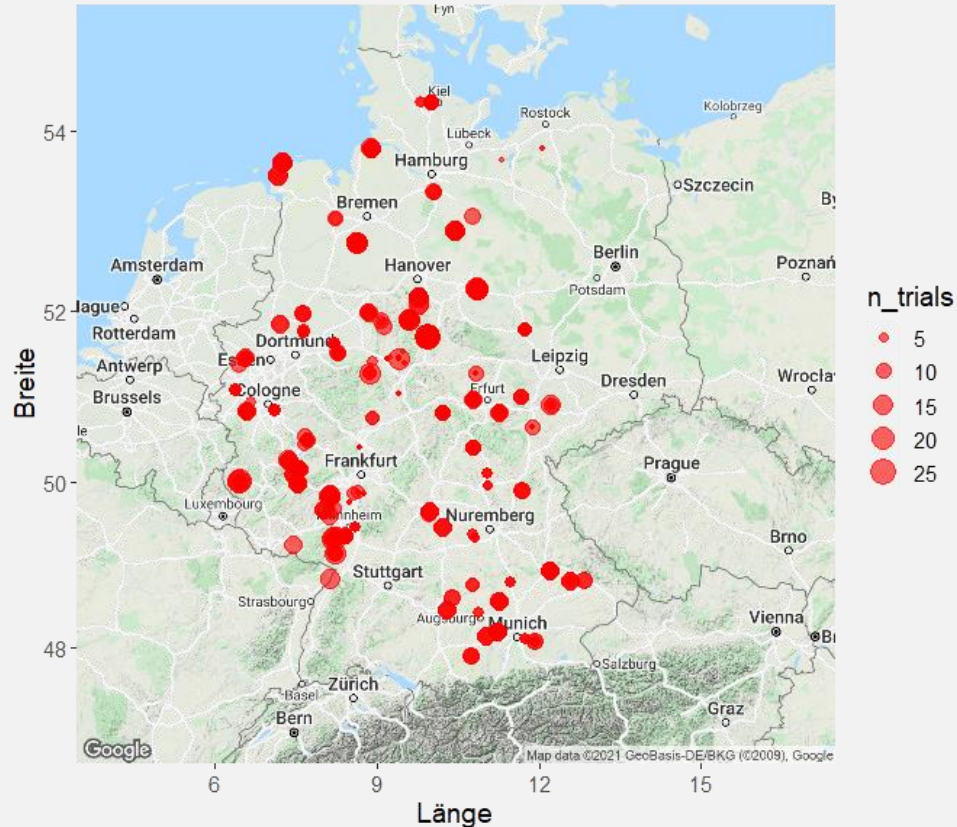
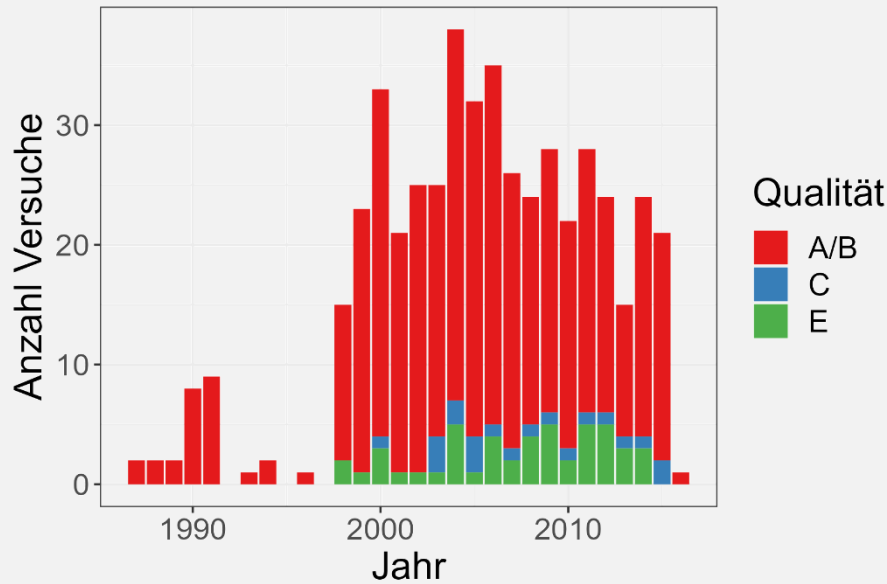
Evaluierung DüV Winterweizen/Winterraps

- Erste Analyse 2016 publiziert
- 2021 um weitere Daten ergänzt
- Datensätze
 - Winterweizen
 - 424 N-Steigerungsversuche
 - Länderdienststellen + Hohenschulen N-Versuch
 - Winterraps
 - 141 N-Steigerungsversuche
 - UFOP-Projekt 117 N-Steigerungsreihen
 - FNR-Projekt 15 N-Steigerungsreihen
 - Hohenschulen N-Versuch: 10 Steigerungsreihen



■ 487 Steigerungsreihen

– 424 auswertbar



Preisszenarien.

Referenzpreis Backweizen (A/B Qualität): 200 EUR/t
Stickstoffdünger: 0,9 €/kg N



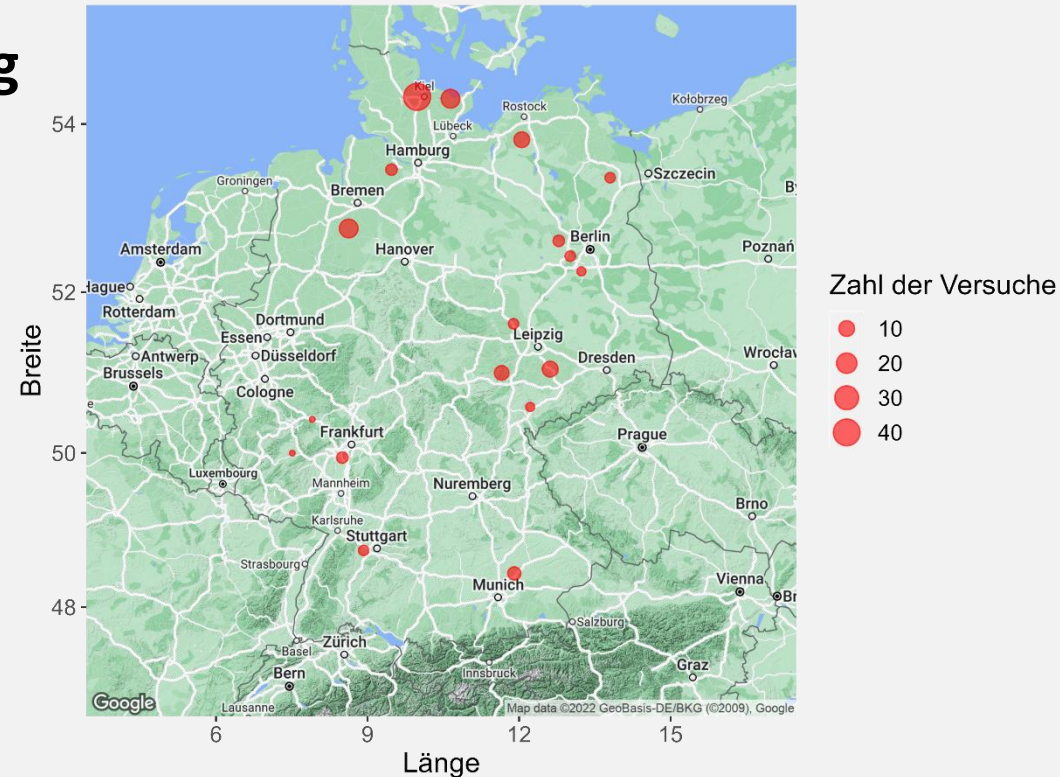
Auswertung N-Steigerungsversuche Winterraps

■ 132 Steigerungsreihen

- 79 ohne Herbstdüngung
- 53 mit Herbstdüngung

■ Preisszenarien

- **Niedrig**
 - 500 €/t Raps @40% Öl
 - 0,9 €/kg N
- **Hoch**
 - 600 €/t Raps @40% Öl
 - 2 €/kg N



Ex post vs. ex ante

■ *Ex post*

- Auswertung im „Nachhinein“
 - Ermittlung des Düngungsoptimums für jeden einzelnen Versuch
 - Bildung eines Mittelwertes

■ *Ex ante*

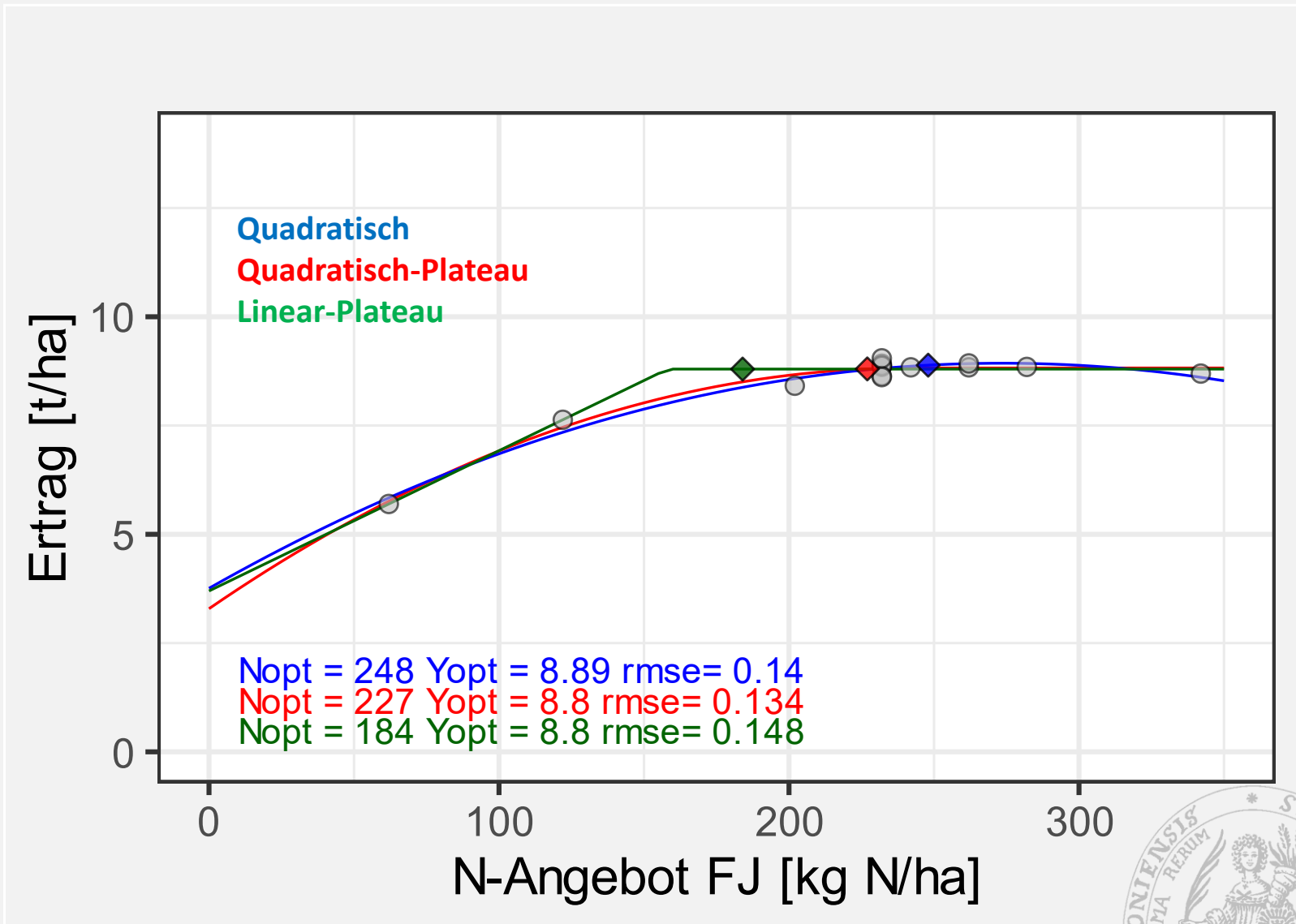
- Prognose „im Voraus, von vornherein“
 - Ermittlung eines einheitlichen Wertes für alle Versuche

■ *Düngungsentscheidung/-empfehlung*

- ist immer eine ex ante - Situation



Beispiel: Anpassung Ertragsfunktionen Datensatz Winterweizen



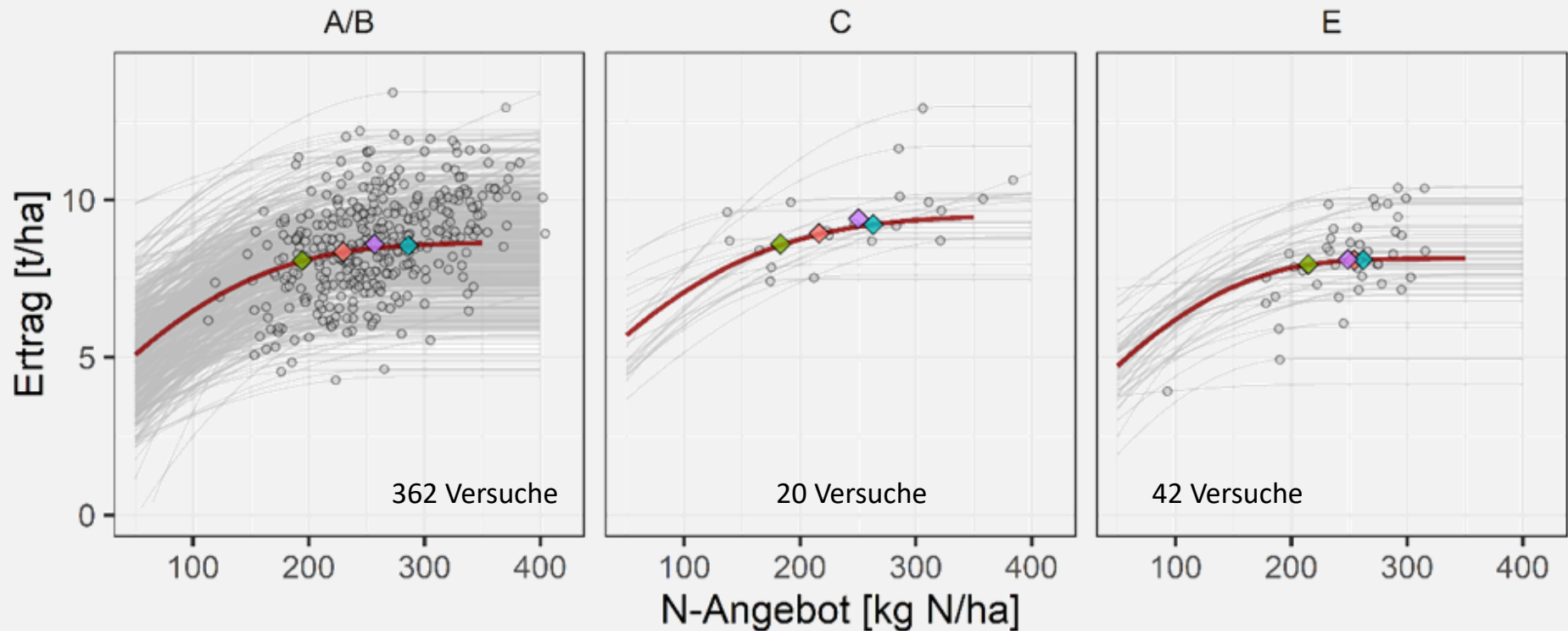
Effekte der Regressionsmodelle Quadratisch (Q), Quadratisch-Plateau (QP) und Linear-Plateau (LP) auf den mittleren RMSE für den Ertrag [t/ha] von Winterraps und Winterweizen (in Klammern: Abweichung vom Q-Modell)

Modell	RMSE [t/ha]	
	Raps	Weizen
Q	0,320 ^{b#}	0,185 ^b
QP	0,316 ^c (-0,00382)	0,184 ^b (-0,00122)
LP	0,324 ^a (+0,00385)	0,204 ^a (+0,01840)



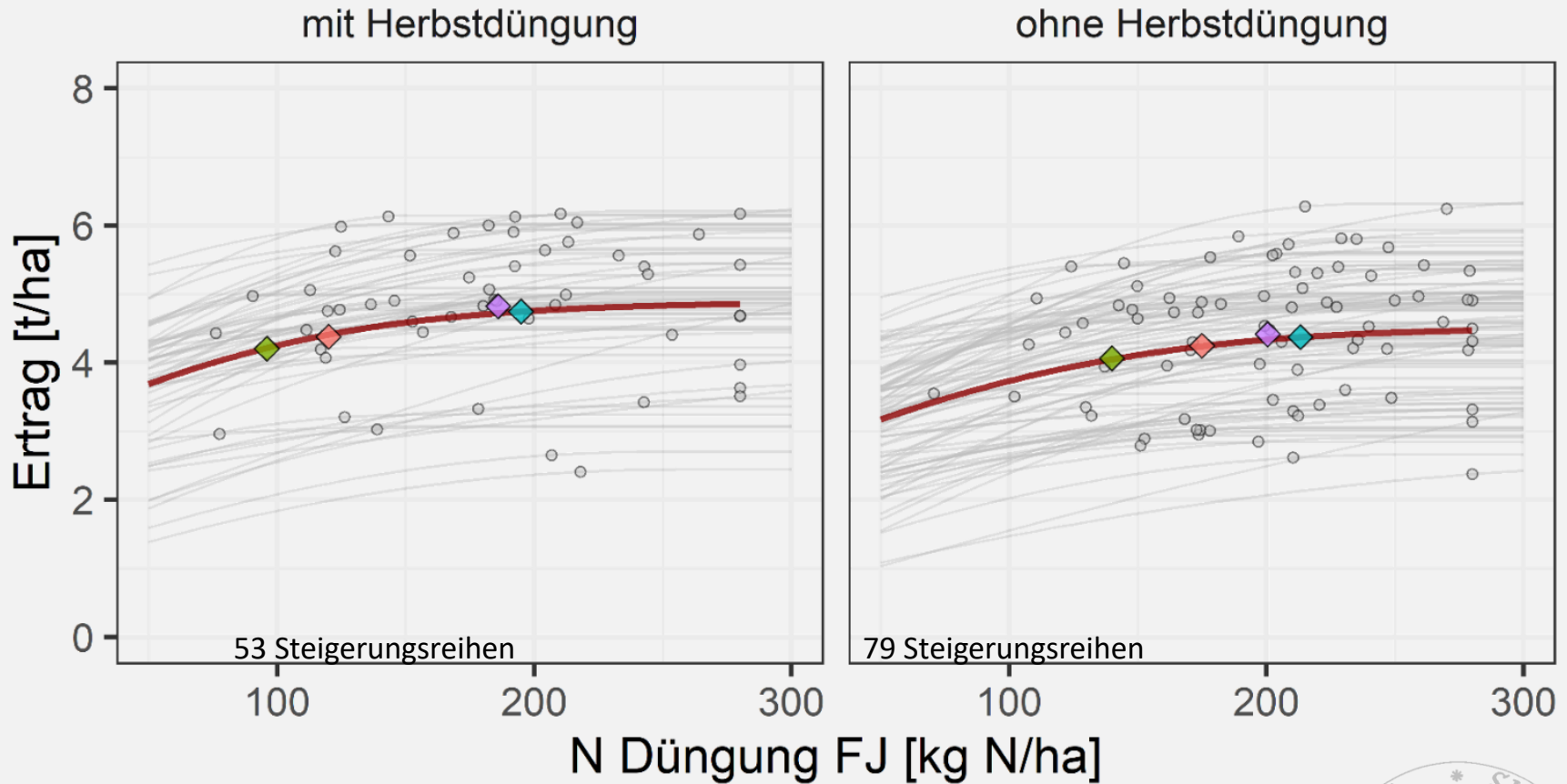
Anpassung von Einzelfunktionen/Ableitung von mittleren Optima/Vergleich DüV Winterweizen (Preisszenario „niedrig“)

Düngung ◆ DüV ◆ DüV-20 ◆ ex ante Nopt ◆ ex post Nopt



Anpassung von Einzelfunktionen/Ableitung von mittleren Optima/Vergleich DüV Winterraps, Szenario „niedrig“

Duengung ◆ DueV ◆ DueV_20 ◆ ex ante Nopt ◆ ex post Nopt



Relativwerte Stickstoffdüngungshöhe bei Preisszenario „niedrige Preise“

	Winterweizen			Winterraps	
	E-Qualität	A/B-Qualität	C-Qualität	ohne Herbst-N	mit Herbst-N
<i>ex ante</i> Nopt	100%	100%	100%	100%	100%
DüV	97%	80%	82%	82%	62%
DüV-20	82%	68%	70%	66%	49%



Effekte der Düngungsszenarien auf die Parameter Ertrag [t/ha], Proteingehalt [%], N-kostenfreie Leistung [€/ha] und Stickstoffbilanz [kg N/ha].

Erste Zeile entspricht dem Wert bei *ex ante* ökonomisch optimaler Stickstoffdüngung (QP-Modell)

	Ertrag [t/ha]	Proteingehalt [%]	NKFL [€/ha]	N-Bilanz [kg N/ha]
N_{opt} (<i>ex ante</i>)	8.42 ***	13.7 ***	1499 ***	58 ***
Δ DüV – N_{opt}	-0.20 ***	-0.88 ***	-17 **	-42 ***
Δ DüV-20% N_{opt}	-0.48 ***	-1.5 ***	-67 ***	-65 ***

* p<0.05 ** p<0.01 *** p<0.001

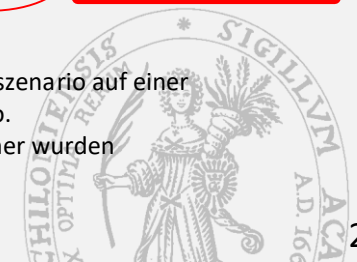


Effekte der Düngungsszenarien auf die Parameter Ertrag [t/ha], Ölkonzentration [%], N-kostenfreie Leistung [Euro/ha] und Stickstoffbilanz [kg N/ha] von Winterraps bei ökonomisch optimaler N-Düngung (Nopt) geschätzt mittels QP-Funktion.

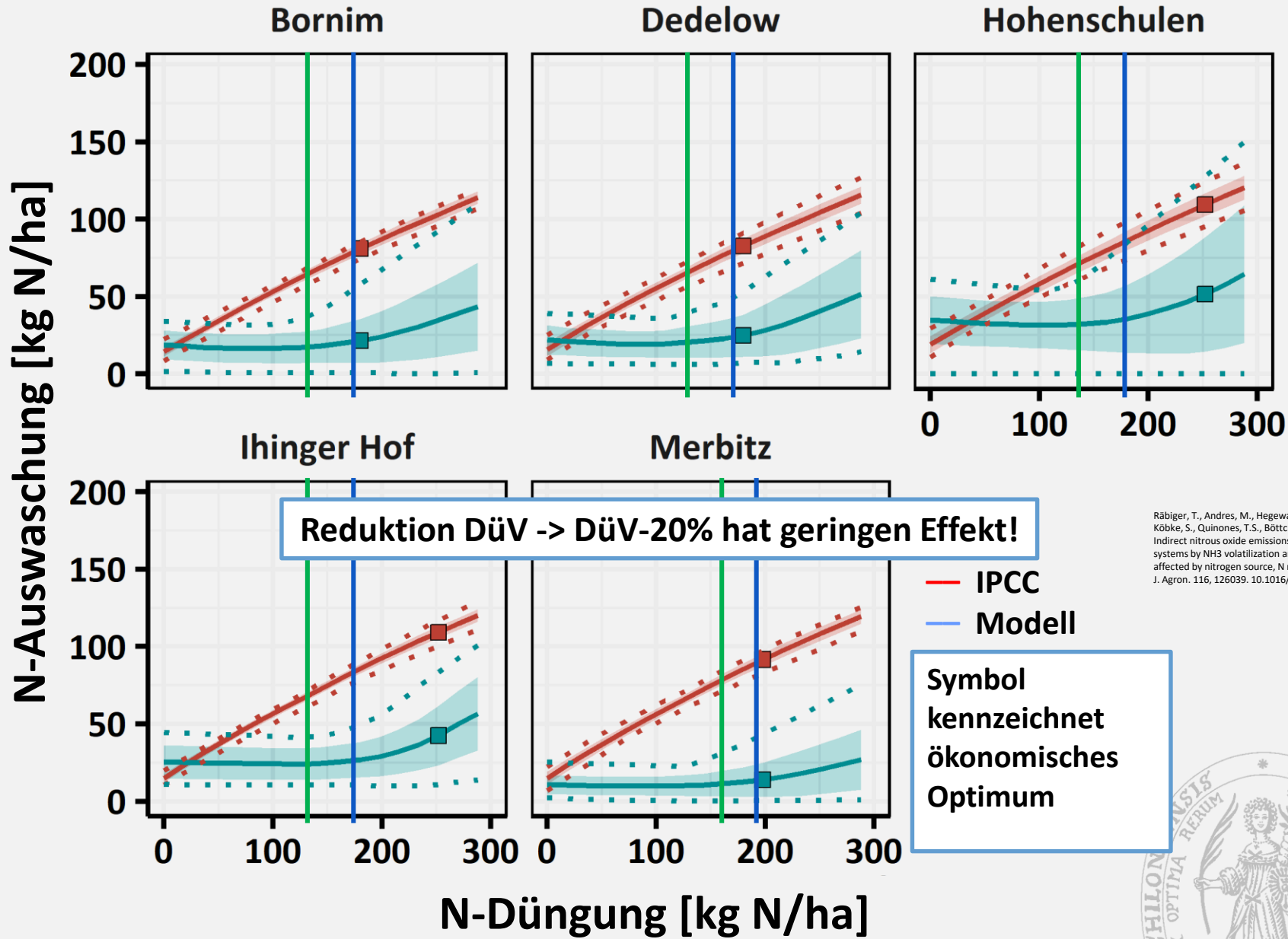
Parameter	Herbst-N-Düngung	Szenario			Diff
		Ex ante Nopt	DüV	DüV-20	Nopt-Düv-20
Samenertrag [t/ha]	mit	4,42 ^a _A	4,05 ^b _A	3,88 ^c _A	-0.51
	ohne	4,22 ^{ab} _B	4,10 ^b _A	3,91 ^c _A	
N-Bilanz [kg N/ha]	mit	118 ^a _A	60 ^b _A	43 ^c _A	-91
	ohne	84 ^a _B	54 ^c _A	27 ^d _B	
NKFL [Euro/ha]	mit	2041 ^a _A	1947 ^b _A	1887 ^b _A	-137
	ohne	1971 ^{ab} _B	1955 ^{ab} _A	1904 ^b _A	
Ölkonzentration [%]	mit	41,4 ^b _A	42,2 ^a _A	42,5 ^a _A	1
	ohne	41,5 ^c _A	42,0 ^b _B	42,4 ^a _A	

- gleiche Buchstaben bedeuten keine signifikanten Unterschiede bei P = 0,05, Kleinbuchstaben: Vergleich zwischen Düngungsszenario auf einer Stufe Herbstdüngung, Großbuchstaben Vergleich zwischen N-Herbstdüngung auf einer Stufe Düngungsszenario.

Bei allen Parametern gab es signifikante Interaktionen (P < 0,05) zwischen dem Szenario und der Herbst-N-Düngung, daher wurden Mittelwertvergleiche getrennt auf den Stufen des jeweils anderen Faktors durchgeführt.



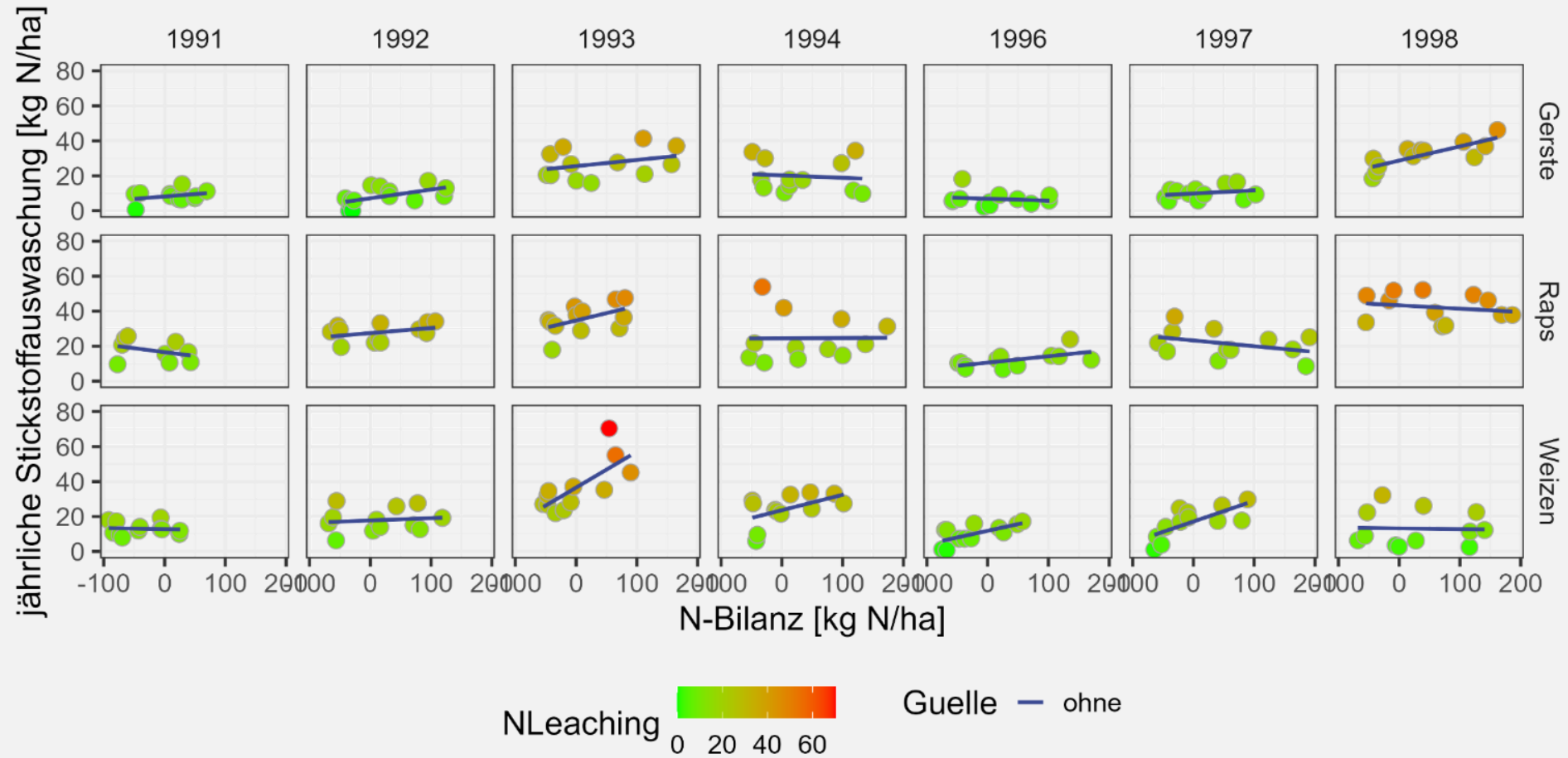
Düngungshöhe und N Auswaschung nach Raps



Rübiger, T., Andres, M., Hegewald, H., Kesenheimer, K., Köbke, S., Quinones, T.S., Böttcher, U., Kage, H., 2020. Indirect nitrous oxide emissions from oilseed rape cropping systems by NH3 volatilization and nitrate leaching as affected by nitrogen source, N rate and site conditions. Eur. J. Agron. 116, 126039. 10.1016/j.eja.2020.126039.



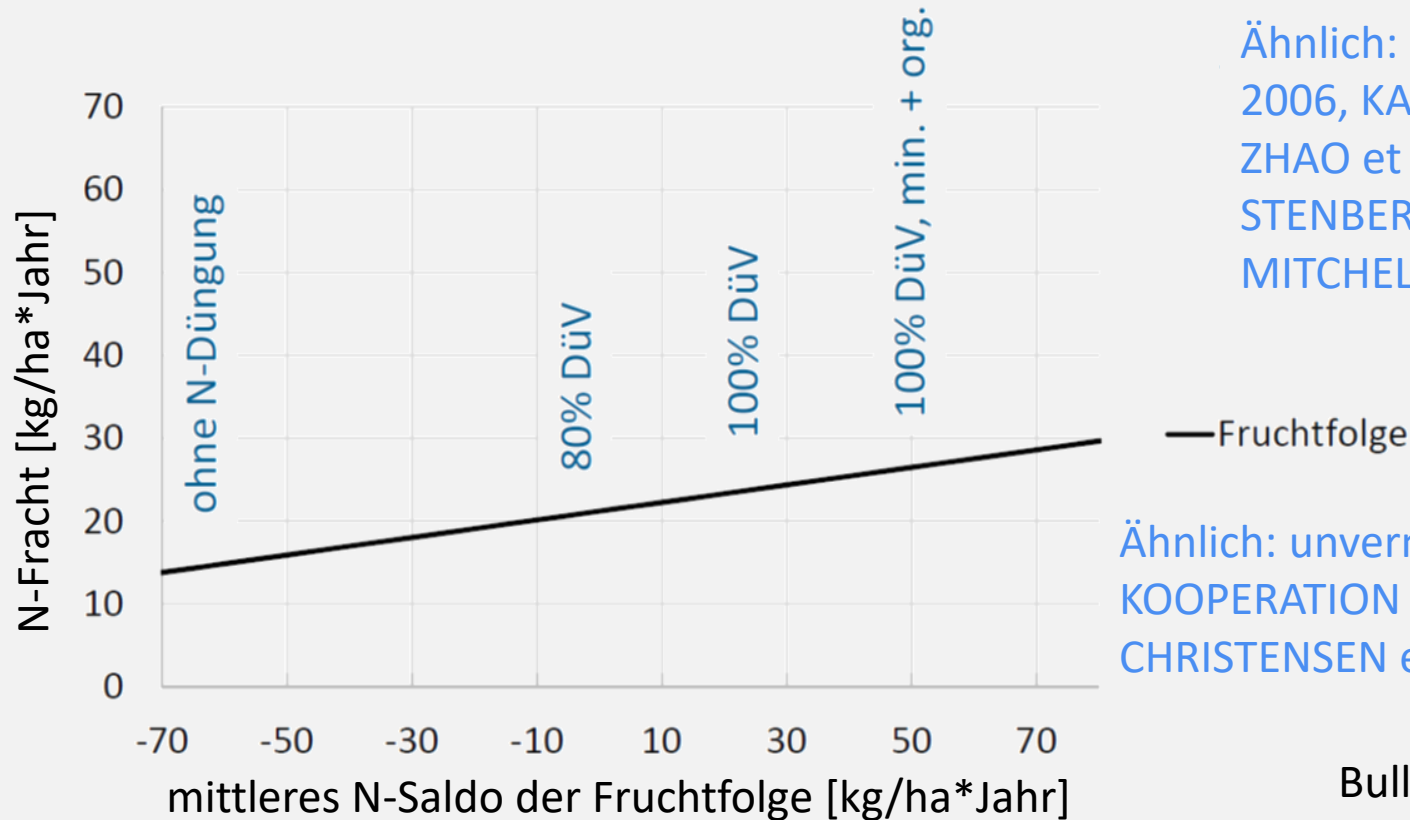
Beziehung zwischen N-Bilanz und N-Auswaschung in einer Gerste-Raps-Weizenfruchtfolge



Berechnung: interpolierte gemessene Nitratkonzentration 90cm * simulierte Sickerwasserrate



Einfluss des mehrjährigen N-Saldos auf die Nitratauswaschung (Gülzow/Mecklenburg)



Ähnlich: SIELING & KAGE 2006, KAGE et al. 2022, ZHAO et al. 2020, DELIN & STENBERG 2014, LORD & MITCHELL 1998

Ähnlich: unvermeidbarer Austrag: KOOPERATION LYSIMETER 2013 CHRISTENSEN et al. 2021

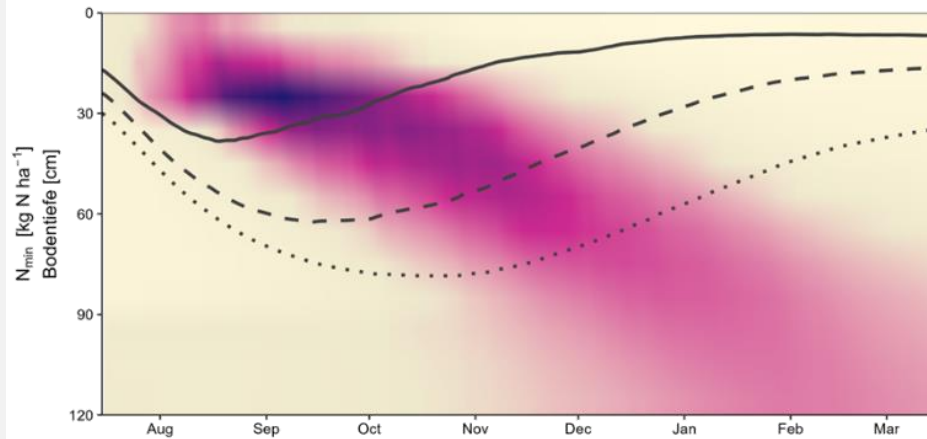
Bull et al. (2023)

Mittlere N-Fracht der Fruchtfolge Winterraps-Winterweizen (Zwischenfrucht)-Silomais-Wintertriticale im Sickerwasser in 60 cm Bodentiefe während der Sickerwasserperiode in Abhängigkeit vom mittleren N-Saldo der Fruchtfolge, Gülzow 11/2017-04/2022, (mit hydrologischem Jahr 2018/19)

Reduktion der Stickstoffauswaschung nach Winterraps durch Zwischenfruchtanbau: 30 jähriges Mittel Beispiel Kiel

BRACHE

Auswaschung 67 kg

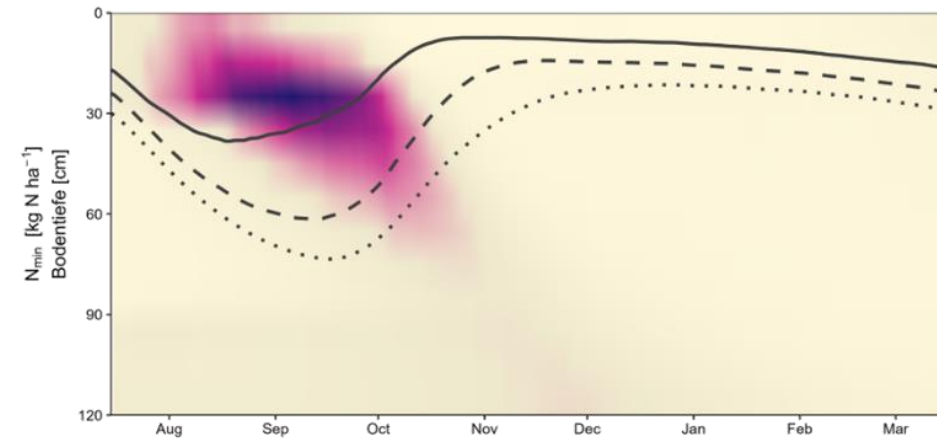
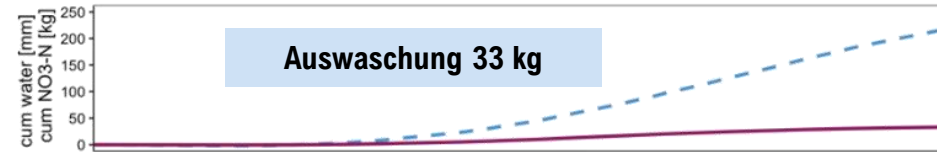


— N_{min_sim} 0-30 cm
 - - N_{min_sim} 0-60 cm
 · · N_{min_sim} 0-90 cm

N_{min} [kg N 10 cm⁻¹]
 4 8 12 16

ÖLRETTICH

Auswaschung 33 kg

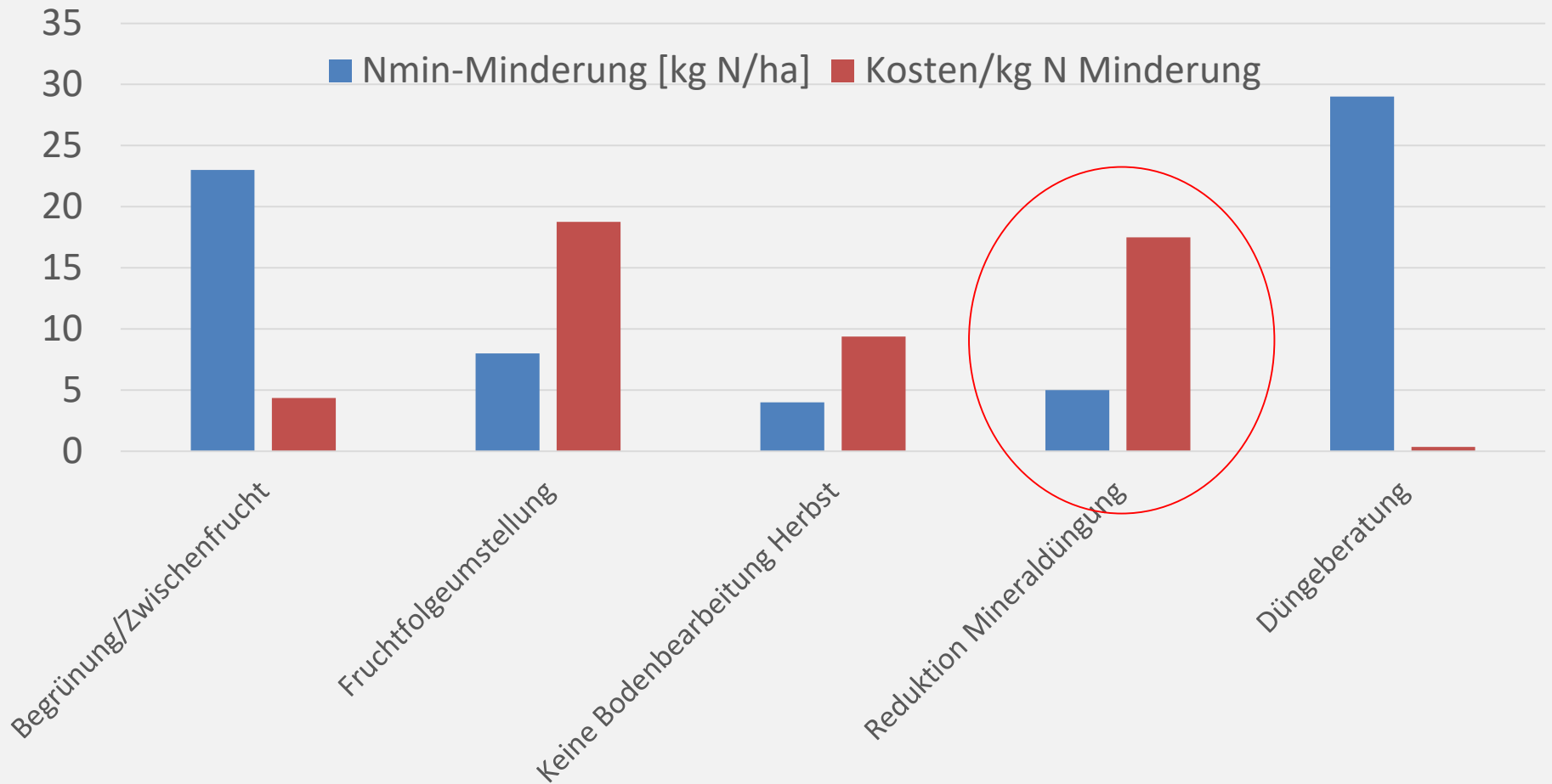


— N_{min_sim} 0-30 cm
 - - N_{min_sim} 0-60 cm
 · · N_{min_sim} 0-90 cm

N_{min} [kg N 10 cm⁻¹]
 4 8 12 16



Kosteneffizienz verschiedener Maßnahmen zur Reduktion von Herbst-Nmin



Effekte unterschiedlicher Maßnahmen in Kooperationsprojekten auf die Nmin-Gehalte im Herbst sowie die Relation zu den Kosten dieser Maßnahmen (Kosten/kg N-Minderung). Eigene Abbildung, Daten aus FAL (2007): Maßnahmen zur Reduzierung von Stickstoffeinträgen in Gewässer - eine wasserschutzorientierte Landwirtschaft zur Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie. Hrsg. Bernhard Osterburg, Tania Runge, Landbauforschung Völkenrode - FAL Agricultural Research Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Braunschweig, ISBN 978-3-86576-031-9.

Düngerordnung und Reduktion um 20%

- **Ableitung Bedarfswerte wenig transparent**
- **Für Raps und Weizen**
 - unterhalb ökonomischem Optimum
 - “Dänemark Stufe 1”
- **Ökonomische Auswirkungen DüV 2017**
 - “Überschaubar”
- **20% Reduktion**
 - Wenig wirksam auf N-Auswaschung (Raps/Weizen)
 - Im Vergleich zur Wirkung: Teuer



Effekte der Stickstoffdüngung auf Klimaindikatoren



Wirkungen von Stickstoff auf THG-Emissionen im Ackerbau

■ Produktivität

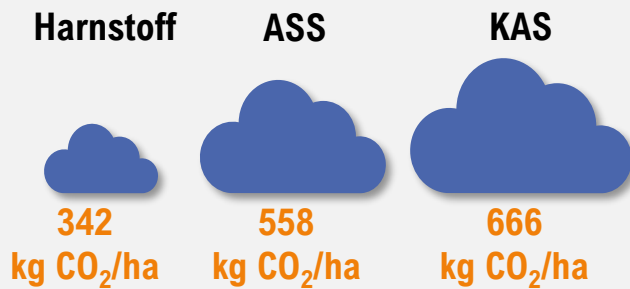
- Einsparung von Fläche
 - Vermeidung ILUC
- Ggf. Nutzung als Bioenergie
- Ernterückstände
 - Erhöhung/
Stabilisierung
Humusgehalte

■ Emissionen

- CO₂-Herstellungsemissionen
- Lachgasemissionen
 - Produktion (N-Dünger)
 - Feldemissionen
 - Direkt
 - Indirekt



Herstellungsemissionen



nur mineralischer N-Dünger

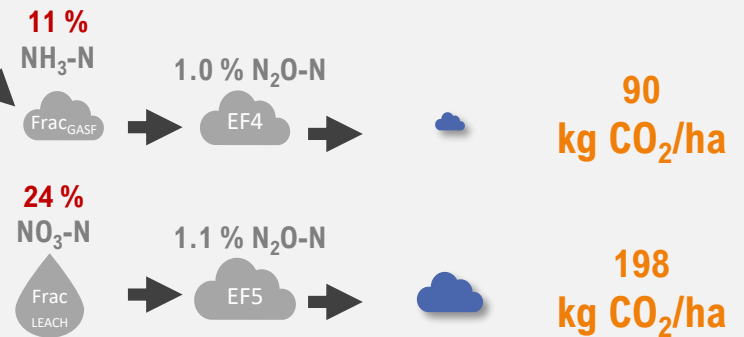
+ Sonstige Feldemissionen (Diesel, etc.)
≈ 0.5 t CO₂/ha

180 kg N/ha

direkte N₂O-Emissionen



indirekte N₂O-Emissionen



min/org Dünger / Ernterückstände

≈ 0.5 + 1.2 =
1.9
t CO₂/ha

Mathivanan et al. (2021)
IPCC (2019)
IPCC (2021)
JRC (2019)

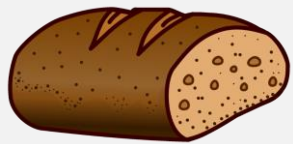


Ernährung

vs.

Energie (Ethanol)

9400 Brote à 1 kg



Jahresbedarf 25 Menschen
(Energie & Protein)



1.2
t CO₂/ha

8
t Weizen/ha



62 GJ
Ethanol/ha

- 4
t CO₂/ha

- 5.2
t CO₂/ha

Emissionen
1.9 t CO₂/ha

5-8
t Stroh/ha

2.4
t DDGS

2.9
t Mais/Soja
Substitution



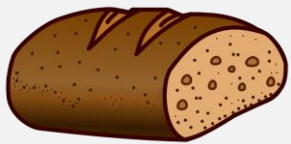
Ernährung

vs.

Energie

(Verbrennung Korn/40% Stroh)

9400 Brote à 1 kg



Jahresbedarf 25 Menschen



8
t Weizen/ha

2-3
t Stroh/ha

- 4
t CO₂/ha

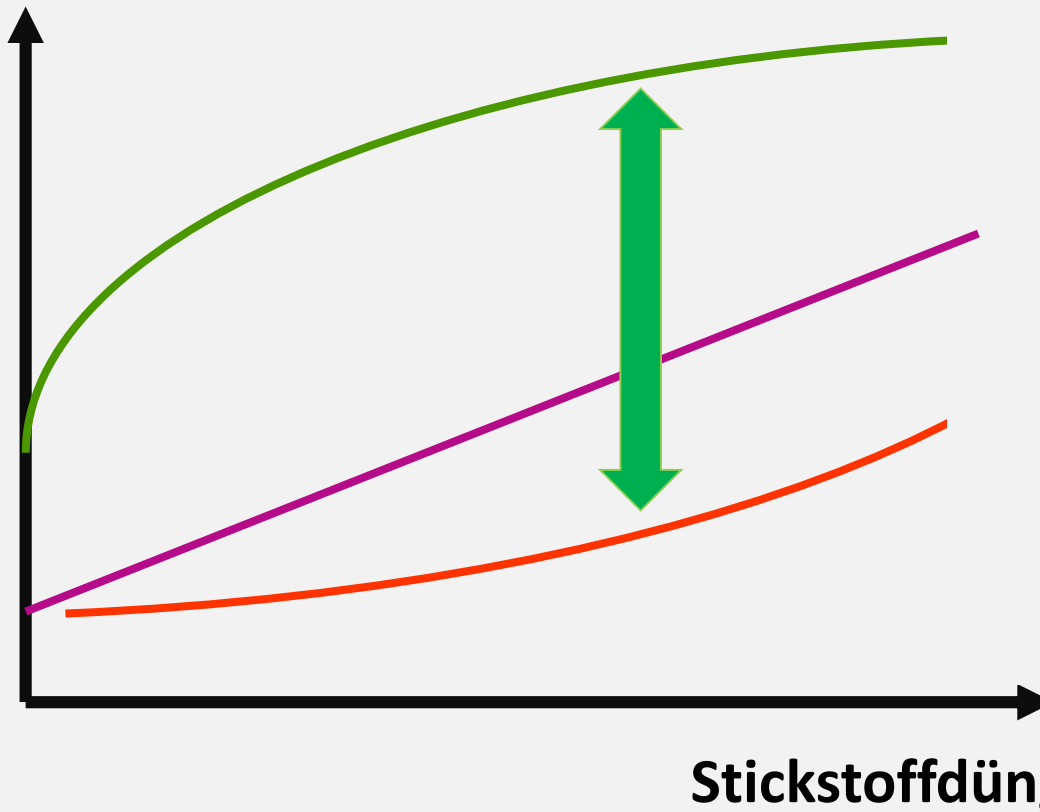
156 GJ
Heiz-
energie/ha

- 14.7
t CO₂/ha

Emissionen
1.9 t CO₂/ha



Produktivität & Klimawirkung: wo liegt das Optimum? Wie bewerten?



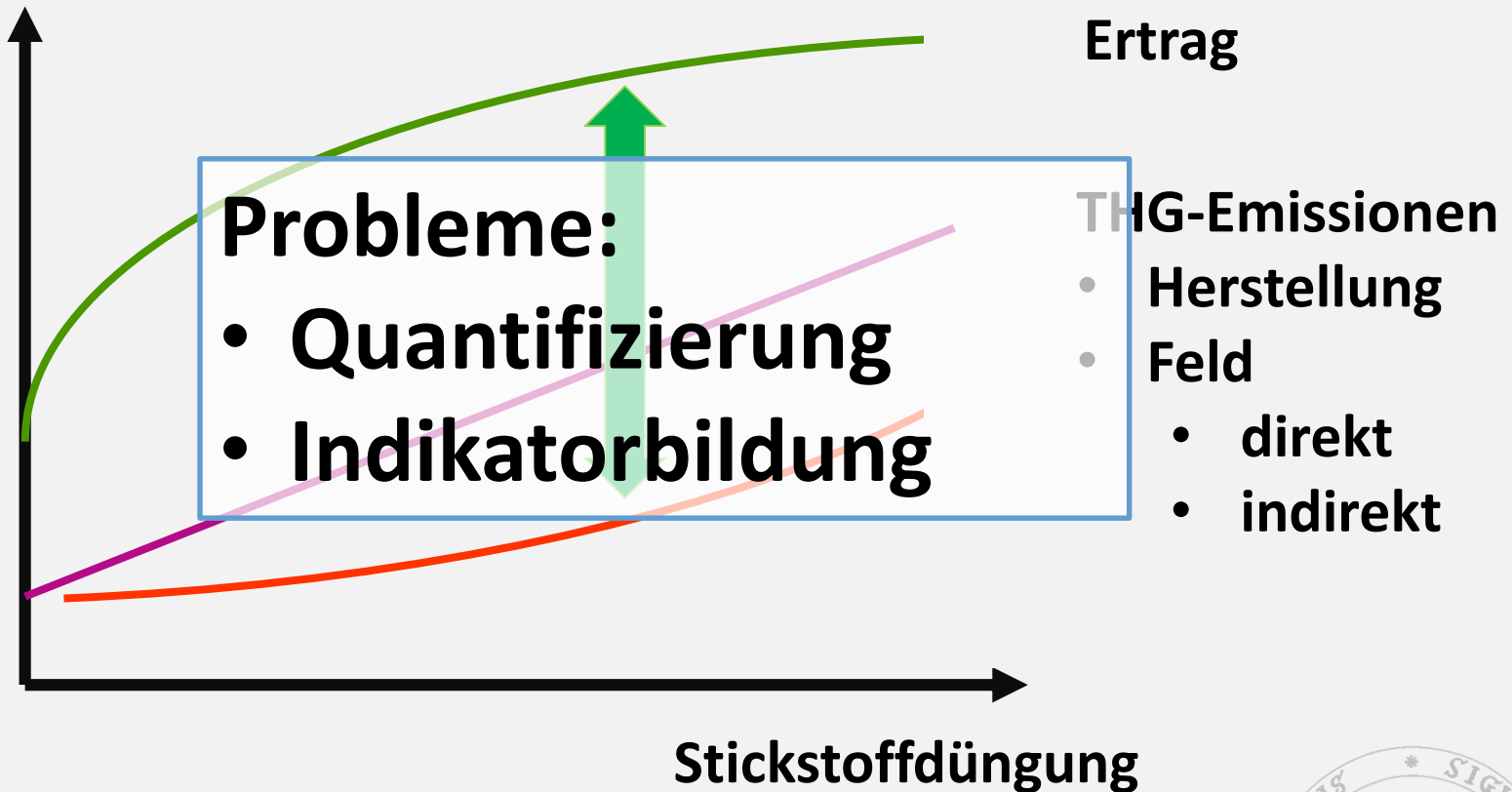
Ertrag

THG-Emissionen

- Herstellung
- Feld
 - direkt
 - indirekt

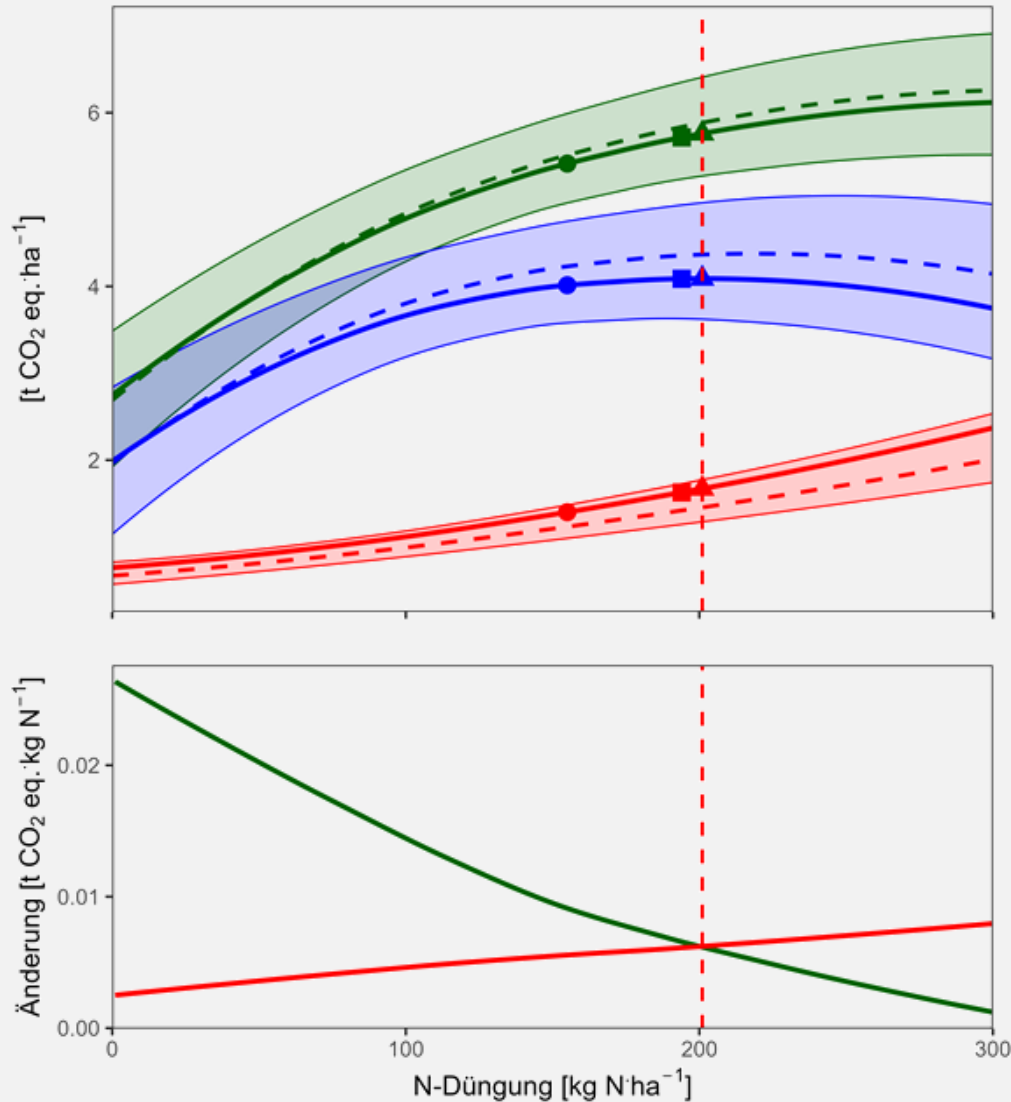


Produktivität & Klimawirkung: wo liegt das Optimum? Wie bewerten?



THG-Emissionen, Brutto- und Netto THG-Einsparung

Szenario: Biodiesel aus Raps



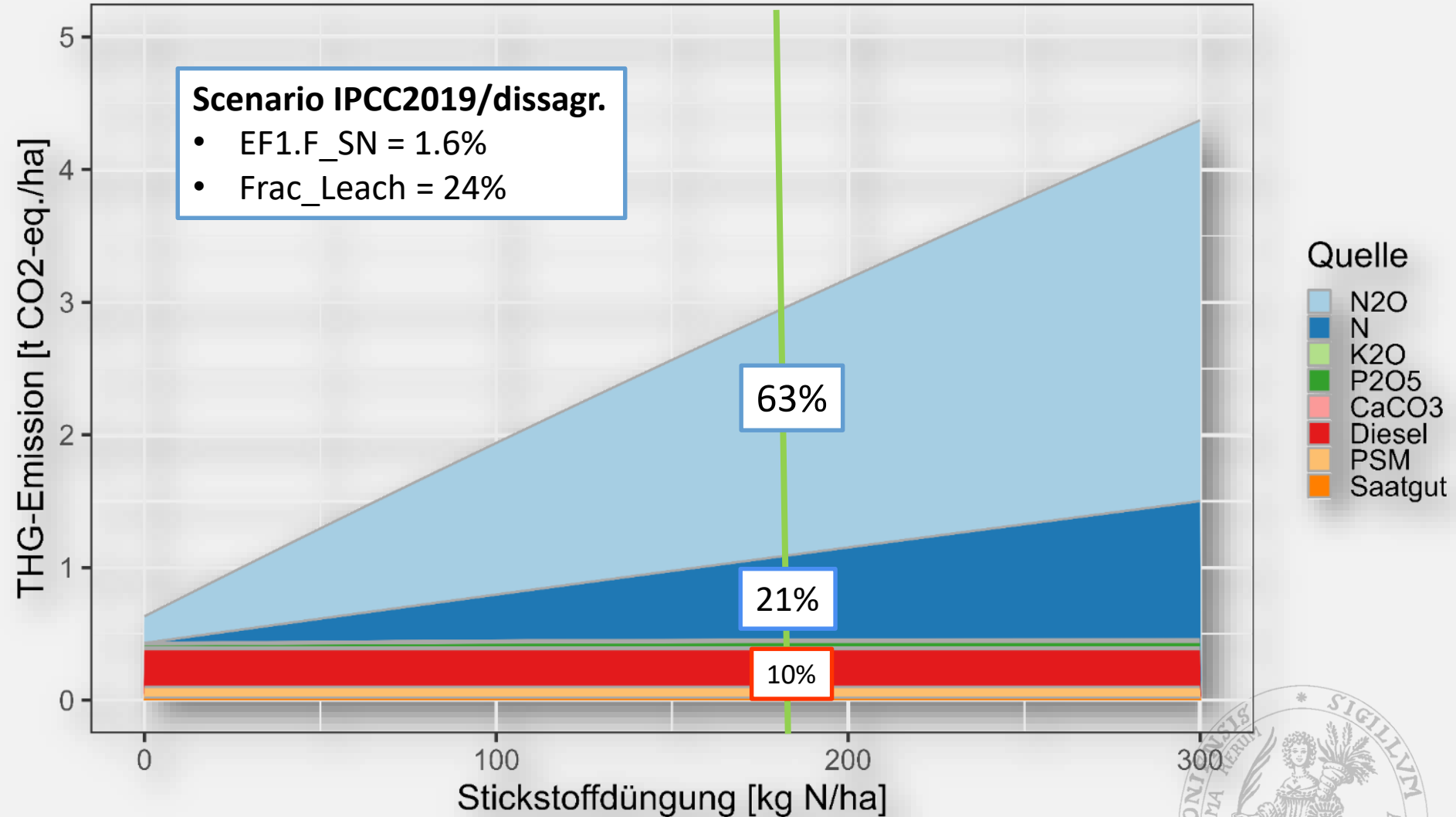
Brutto-THG-Einsparung, allozierte Feldemissionen und Netto-THG-Einsparung als Funktion der Stickstoffdüngung

BZE-Standorte berechnet mit dem Prozessmodell HUME (obere Abbildung) sowie Änderung der Brutto-Emissionen je kg Stickstoffdüngung/ha und Änderung der Emissionen je kg Stickstoffdüngung/ha. Der Schnittpunkt der Ableitungen der Emissionsfunktionen und das Maximum der THG-Einsparung ist mit einer senkrechten roten Linie gekennzeichnet. Die von der Düngeverordnung vorgegebenen Stickstoffdüngungshöhen und das Maximum der Netto-THG-Einsparung sind durch Symbole gekennzeichnet. Die farbigen Bänder kennzeichnen die 25 bzw. 75% Quartile der simulierten Parameter, die durchgezogenen Linien den Mittelwert und die gestrichelten Linien den Median

- Allozierte Feldemissionen
- Brutto-THG-Einsparung
- Nettoeinsparung
- Düngeverordnung
- Düngeverordnung - 20%
- THG-Bilanzopt.
- Änderung Brutto-THG-Einsp.
- Änderung Emissionen



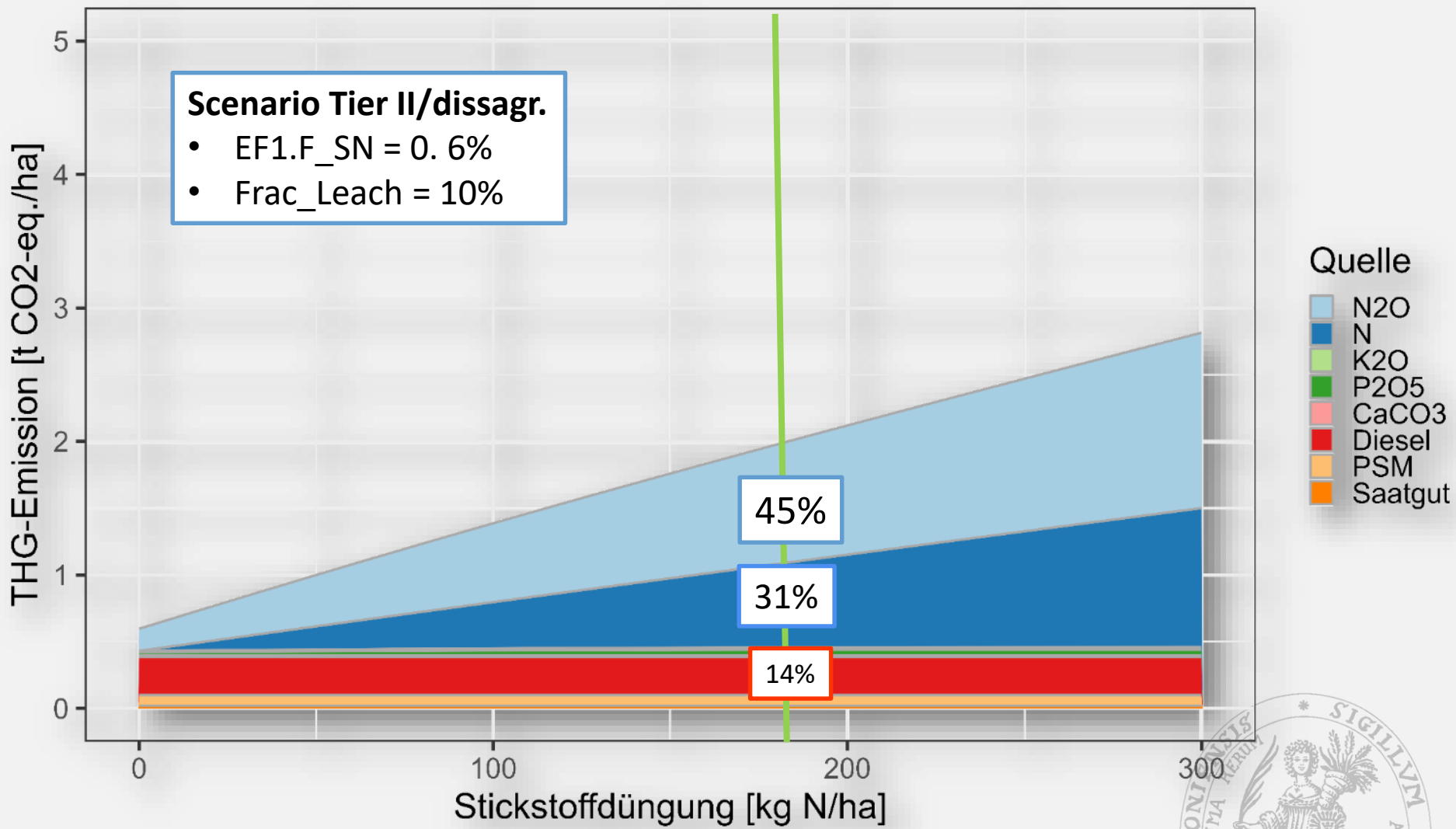
Zusammensetzung der Feldemissionen als Funktion der Stickstoffdüngung



Nach Methode IPCC2019, dissagr./BioGrace, Beispiel Rapsanbau



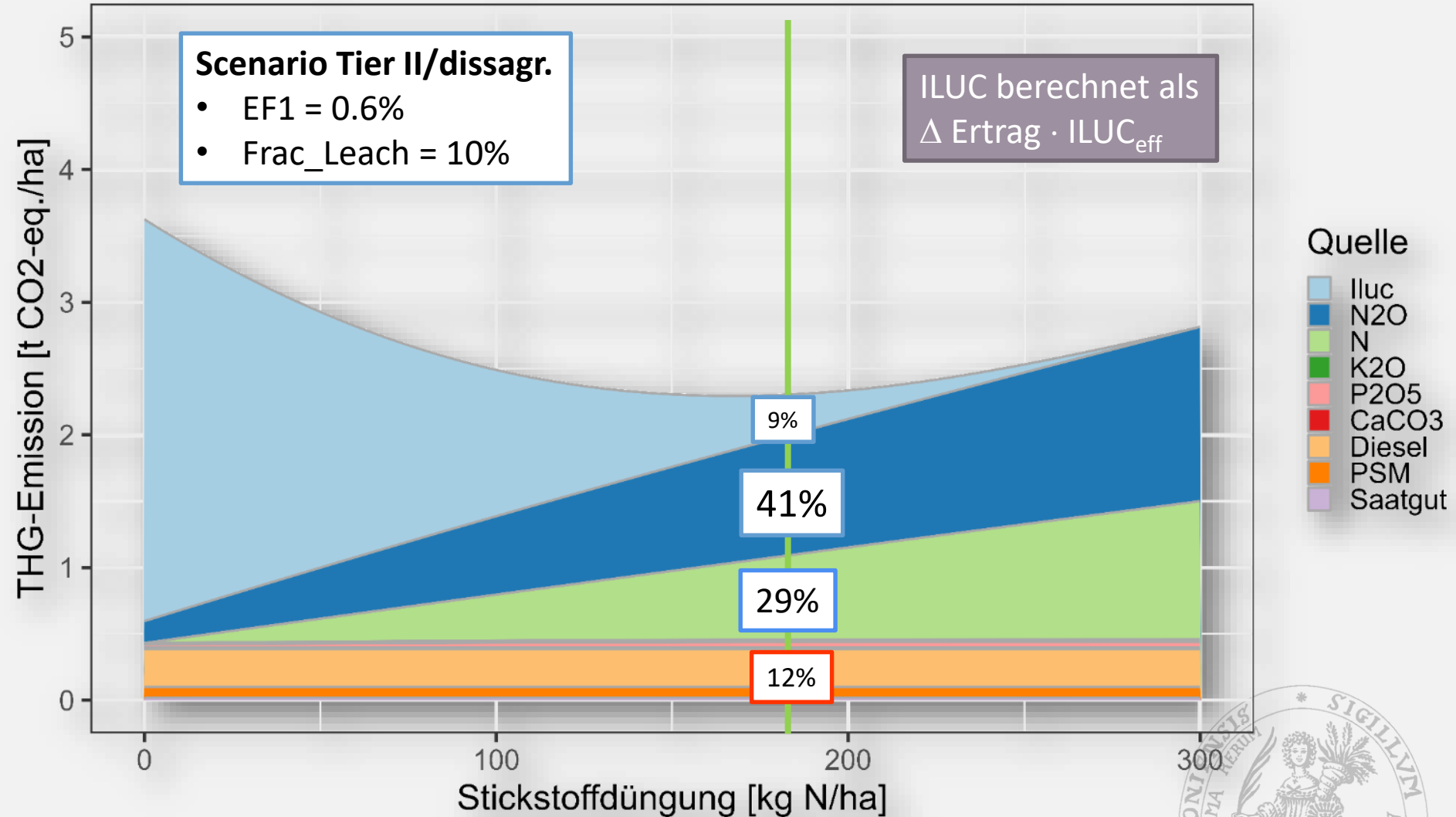
Zusammensetzung der Feldemissionen als Funktion der Stickstoffdüngung



Nach Methode Tier II, dissagr./BioGrace, Beispiel Rapsanbau



Zusammensetzung der Feldemissionen als Funktion der Stickstoffdüngung



Nach Methode Tier II, dissagr./BioGrace, Beispiel Rapsanbau



■ Ertragsbezogene Emission

$$\frac{\text{Emissionen}}{\text{Ertrag}}$$

- **Einheit: t CO₂-äqu. / t Ertrag**

■ (Emission+ILUC)/Ertrag

$$\frac{\text{Emissionen} + \text{ILUC}}{\text{Ertrag}}$$

- **Einheit: t CO₂-äqu. / t Ertrag**

■ Klimagasbilanz

$$+ (\text{Energieertrag} \cdot \text{Emission}_{\text{fossil}}) \\ - (\text{Emissionen} \cdot \text{Allokation})$$

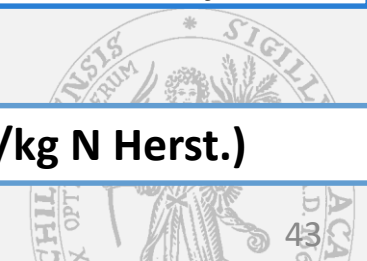
- **Einheit: t CO₂-äqu. / ha**

■ Spezifische Emission

$$1 - \frac{\text{Emissionen} \cdot \text{Allokation}}{\text{Energieertrag} \cdot \text{Emission}_{\text{fossil}}}$$

- **% Reduktion (gegen Em._{fossil})**

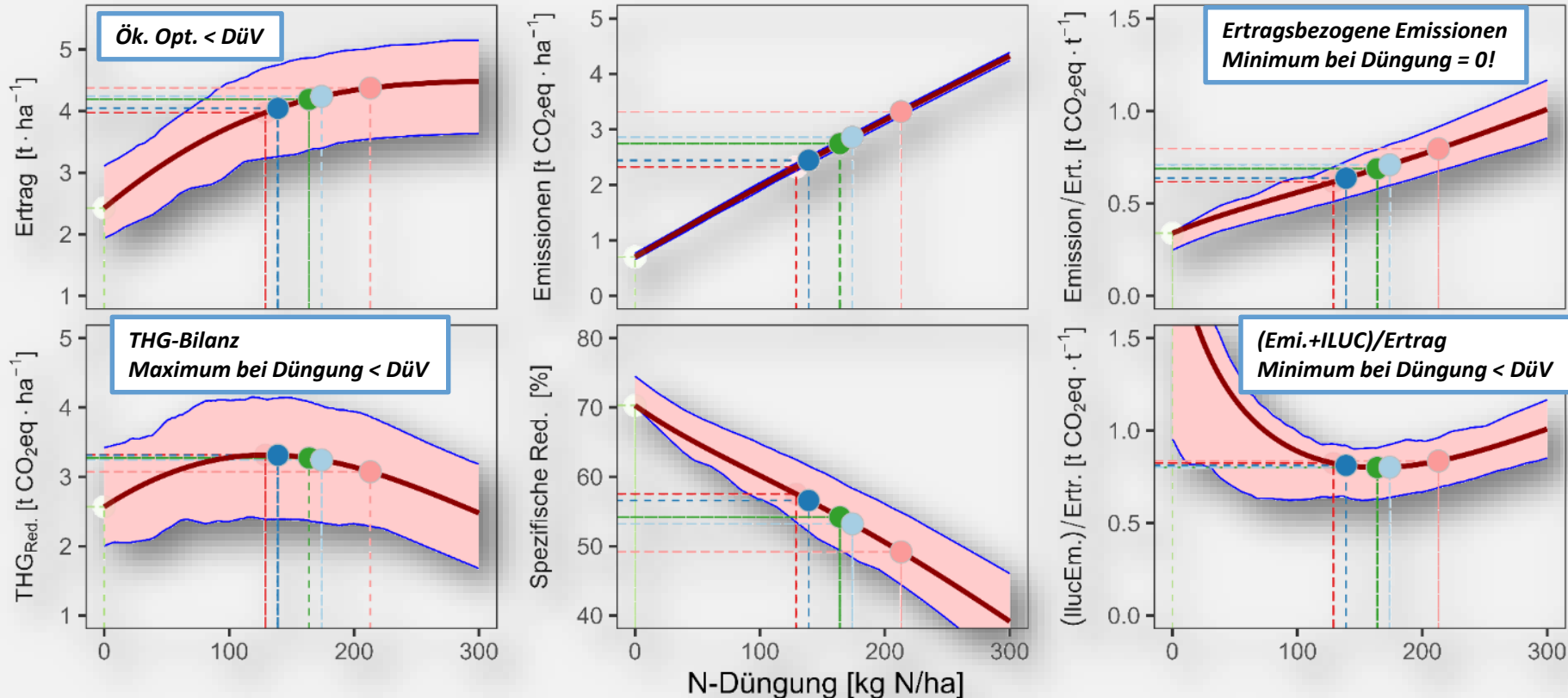
Berechnungsmethodik: BioGrace 1 & 2 (update Parameter, 3469 gCO_{2eq}/kg N Herst.)



Effekte der Stickstoffdüngungshöhe auf Indikatoren im Rapsanbau

Szenario: „hohe Emissionsfaktoren“

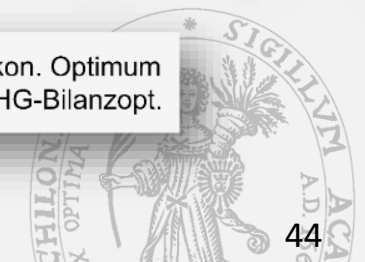
Rapspreis: 500€/t, Stickstoffpreis: 0.9 €/kg N, EF1=1.6%, FracLeach: 24%, eILUC: 3 t [CO_{2eq}·ha⁻¹·a⁻¹]



Düngungsoptimum nach:

- Düngeverordnung
- Min.Em./Ertrag
- ökon. Optimum
- Düngeverordnung - 20%
- MinIlucYield
- THG-Bilanzopt.

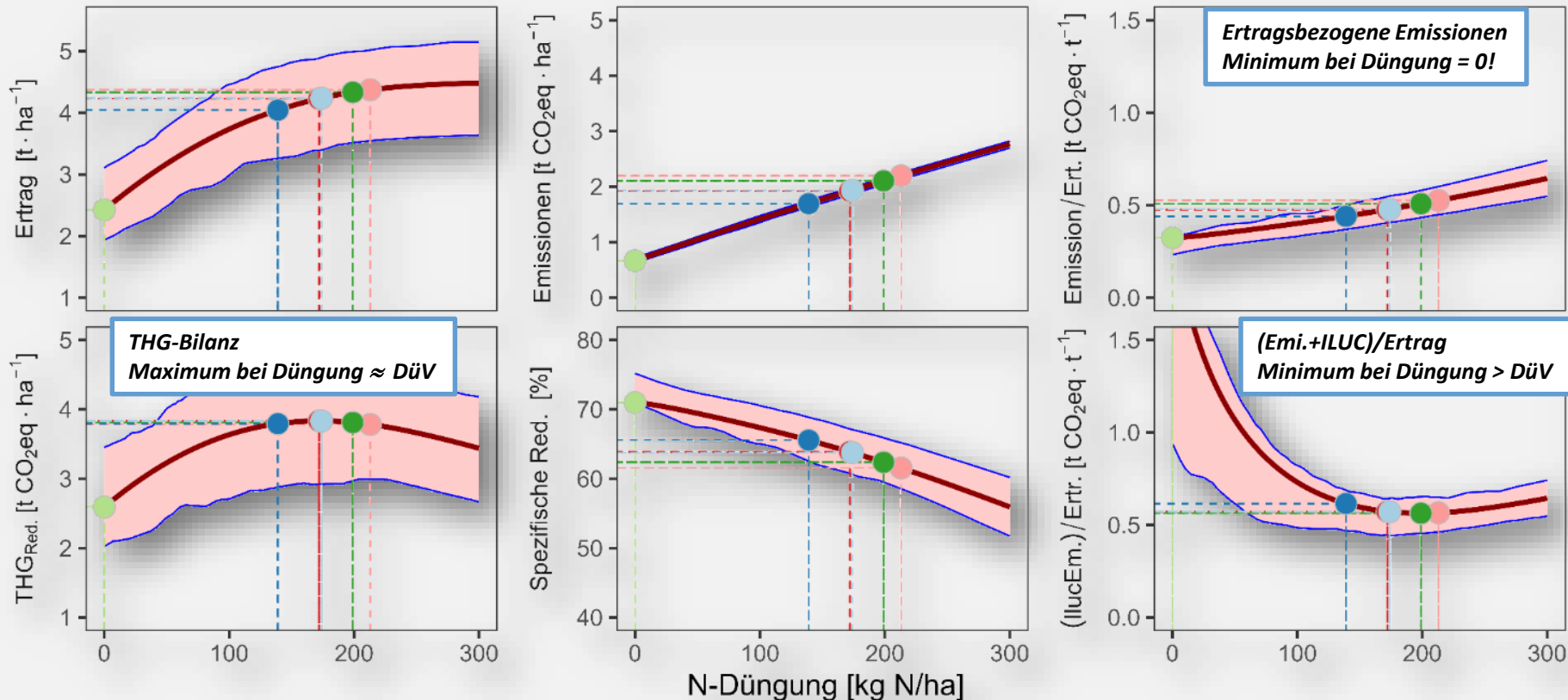
Abkürzungen: THG = Treibhausgas, Red. = Reduktion.
Hellrotes Band beschreibt das 50% Konfidenzintervall.
Dunkelrote Linie beschreibt den Mittelwert.



Effekte der Stickstoffdüngungshöhe auf Indikatoren im Rapsanbau

Szenario: „niedrige Emissionsfaktoren“

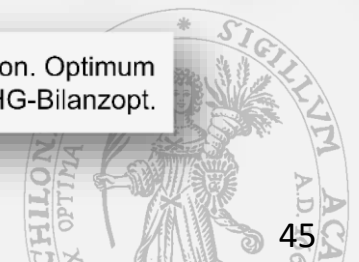
Rapspreis: 500€/t, Stickstoffpreis: 0.9 €/kg N, EF1=0.6%, FracLeach: 10%, eILUC: 3 t [CO_{2eq}·ha⁻¹·a⁻¹]



Düngungsoptimum nach:

- Düngeverordnung
- Min.Em./Ertrag
- ökon. Optimum
- Düngeverordnung - 20%
- MinIlucYield
- THG-Bilanzopt.

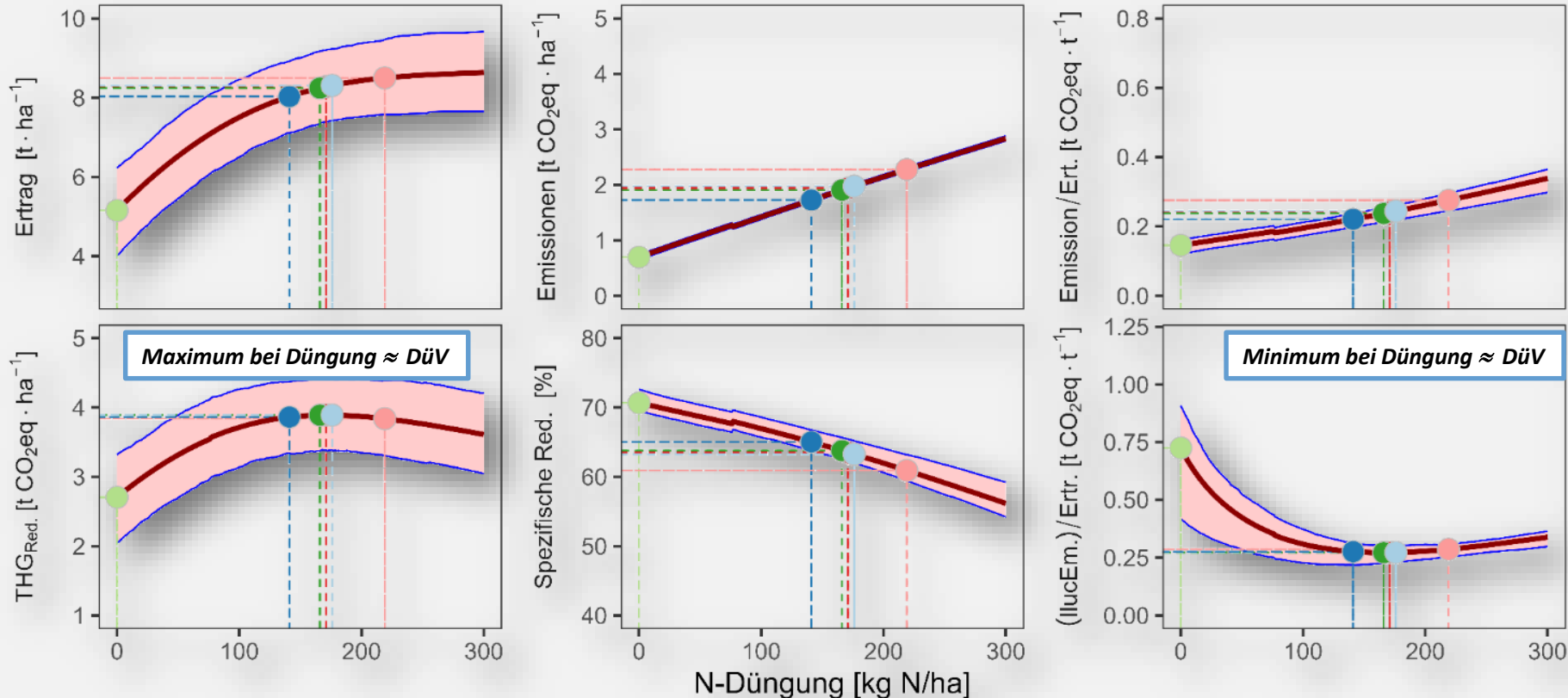
Abkürzungen: THG = Treibhausgas, Red. = Reduktion.
Hellrotes Band beschreibt das 50% Konfidenzintervall.
Dunkelrote Linie beschreibt den Mittelwert.



Effekte der Stickstoffdüngungshöhe auf Indikatoren im Weizenanbau

Szenario: „niedrige Emissionsfaktoren“

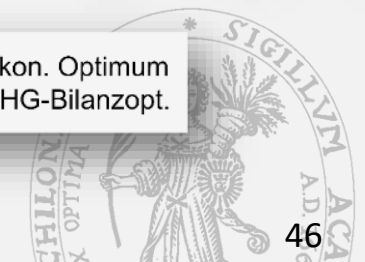
Weizenpreis: 500€/t, Stickstoffpreis: 0.9 €/kg N, EF1=0.6%, FracLeach: 10%, eILUC: 5 t [CO₂eq·ha⁻¹·a⁻¹]



Düngungsoptimum nach:

- Düngeverordnung
- Düngeverordnung - 20%
- Min.Em./Ertrag
- MinIlucYield
- ökon. Optimum
- THG-Bilanzopt.

Abkürzungen: THG = Treibhausgas, Red. = Reduktion.
Hellrotes Band beschreibt das 50% Konfidenzintervall.
Dunkelrote Linie beschreibt den Mittelwert.



Zusammenfassung

■ Indikatoreignung

- Ertragsbezogene & spezifische Emissionen ungeeignet für Ableitung klimaoptimaler Produktionsintensitäten
- THG-Bilanz ermöglicht Bewertung ohne Unsicherheiten von ILUC-Schätzungen
- Berücksichtigung von ILUC
 - Ähnliche Ergebnisse wie THG-Bilanz

■ Bedeutung Emissionsfaktoren für Schätzung/Prognose Emissionen

- Sehr hoch, sowohl Emissionsinventar als auch Bewertung



Zusammenfassung

■ Klimaaoptimale Produktionsintensität Raps/Weizen (Stickstoff)

- Nahe am Niveau der heutigen Praxis
- DüV-20% liegt bereits darunter
- Erträge & Ertragssicherung leisten hohen Beitrag zum Klimaschutz
- Ungezielte Extensivierung & unrealistische Ausbauziele Biolandbau sind eher klimaschädlich

■ Alternative Ansätze

- Am Verbrauch ansetzen nicht an der Produktion!
- Verbesserung der N-Effizienz
 - Nutzung von Fruchtfolgeeffekten
 - Zielgenauere Düngung
 - Zuchtfortschritt



Zeitenwende auch in der Düngung?

Tagung des Verbandes der Landwirtschaftskammern e. V. (VLK)
und des Bundesarbeitskreises Düngung (BAD) 25. und 26. April 2023



Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit!