



# **Berichte über Landwirtschaft**

Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft

**BAND 100 | Ausgabe 1**

**Agrarwissenschaft**  
**Forschung**  

---

**Praxis**

## Stickstoffdüngung zu Winterraps und Winterweizen

### Eine Evaluierung der Düngeverordnung, methodischer Aspekte der Auswertung von Düngeversuchen sowie der Beziehung zwischen Düngungshöhe und Stickstoffauswaschung

Von Henning Kage, Thomas Rübiger, Klaus Sieling

#### 1 Einleitung

Die Düngung mit Stickstoff (N) in der Landwirtschaft wird seit langem intensiv und kontrovers diskutiert. Einerseits ist eine dem Pflanzenbedarf in Höhe und Terminierung angepasste N-Versorgung erforderlich, um hohe Erträge in hoher Qualität zu ermöglichen. Die Bestimmung der korrekten N-Düngermenge ist aber aufgrund variabler Witterungs- und Bodenbedingungen schwierig zu realisieren. Andererseits belastet eine über dem Pflanzenbedarf liegende N-Düngung die Umwelt durch Nitratverlagerung in das Grundwasser, durch Eutrophierung von naturnahen Ökosystemen und durch Emission von klimarelevanten Gasen (insb. Lachgas,  $N_2O$ ). Vor diesem Hintergrund beschloss die EU bereits 1991 die EU Nitrate Directive 91/676/EWG (Nitratrichtlinie), die mit der Düngeverordnung (DüV, zuletzt geändert 2020) (BMEL 2017) in nationales Recht umgesetzt wurde, mit dem Ziel, unerwünschte Umweltwirkungen der N-Düngung zu mindern. Um die wirtschaftlichen Auswirkungen von Düngerrestriktionen auf die landwirtschaftlichen Betriebe auf das notwendige Maß zu beschränken und unerwünschte leakage-Effekte, d.h. eine Verschiebung der Emissionen in andere Produktionsländer, zu vermeiden, kommt der möglichst zielgenauen Ausgestaltung rechtlicher Regelungen besondere Bedeutung zu. Dies folgt im Übrigen auch aus dem Verhältnismäßigkeitsgrundsatz des Grundgesetzes (Art. 20 GG).

Mit der Novellierung der DüV in 2017 wurde u.a. erstmalig eine einheitliche Berechnungsgrundlage für den N-Düngebedarf von landwirtschaftlich und gartenbaulich genutzten Kulturpflanzen vorgegeben. Dieser N-Düngebedarf basiert auf Kulturart spezifischen N-Bedarfswerten, die u.a. um das standortübliche Ertragsniveau der letzten 5 Jahre, Vorfrucht, organische Düngung und Zwischenfruchtanbau sowie um den Vorrat an mineralischem Stickstoff ( $N_{min} = NO_3-N + NH_4-N$ ) in der Bodenschicht 0 - 90 cm zu Vegetationsbeginn korrigiert werden. Zudem ist das Ausbringen von Düngemitteln mit einem wesentlichen Gehalt an Stickstoff nach der Ernte der letzten Hauptfrucht bis zum 31. Januar nur in Ausnahmefällen (u.a. zu Zwischenfrüchten, Winterraps und Wintergerste nach

Getreidevorfrucht) bis zu einer Höhe des N-Düngebedarfs, max. 30 kg  $\text{NH}_4\text{-N/ha}$  oder 60 kg Gesamt-N/ha erlaubt. In Gebieten, welche nach Landesverordnung als besonders gefährdet ausgewiesen sind ('Rote Gebiete'), ist die N-Düngung nach § 13a DüV zusätzlich um 20 % zu verringern.

Wie bereits in mehreren Publikationen beschrieben (z. B. CERRATO und BLACKMER, 1990; BULLOCK und BULLOCK 1994a; BÄCKMAN et al., 1997; MAKOWSKI et al., 1999, 2005; BÉLANGER et al., 2000; XIA und YAN, 2011; LYONS et al. 2019), beeinflusst die Wahl der Form der genutzten Ertragsfunktion (N response curve), die die Beziehung zwischen N-Düngung und Ertrag mathematisch beschreibt, die Höhe der maximalen und ökonomisch optimalen N-Düngermenge (Nopt).

Ziel dieser Studie ist es, auf der Grundlage von Ergebnissen aus N-Steigerungsversuchen die Methodik der Ermittlung der optimalen Stickstoffdüngemenge anhand unterschiedlicher Ertragsfunktionen (Linear-Plateau (LP), Quadratisch-Plateau (QP), Quadratisch (Q)) zu analysieren und gleichzeitig die N-Bedarfswerte aus der DüV zu evaluieren. Darüber hinaus werden die Auswirkungen der Vorgaben aus der DüV, insb. auch der zusätzlichen 20 %igen Reduktion der N-Düngung in Roten Gebieten, auf Ertrag, Qualität, ökonomische (N-Kosten freie Leistungen, NKfL) und ökologische (N-Bilanz, N-Effizienz) Kenngrößen dargestellt. Anhand von Daten aus einem langjährigen N-Steigerungsversuch wird darüber hinaus der Zusammenhang zwischen Stickstoffbilanzsaldo und Stickstoffauswaschung untersucht.

Eine solche Analyse erfordert Datensätze aus N-Steigerungsversuchen mit einer entsprechenden Variation der N-Düngung, die über möglichst viele Umwelten (Standort x Jahr Kombinationen) erhoben wurden. Ein großer Teil dieser Feldversuche wurde bei den Landwirtschaftskammern bzw. Landesanstalten der Bundesländer durchgeführt. In die Auswertung flossen ausschließlich Versuche mit 4 oder mehr N-Stufen ein und 93% der auswertbaren Versuche enthielten eine Variante ohne Stickstoffdüngung. Die maximale N-Düngungshöhe lag im Mittel bei 233 kg N/ha und das dabei erreichte N-Angebot bei 285 kg N/ha.

Für Winterraps standen Ergebnisse aus 132 N-Steigerungsreihen mit 5 - 32 N-Stufen und einer Düngung in Höhe von 0 - 320 kg N/ha, die in 50 Umwelten durchgeführt wurden, aus den Jahren 2006-2020 zur Verfügung. Bei Weizen konnten in 424 von 487 Versuchen die ausgewählten Ertragsfunktionen angepasst werden und waren somit auswertbar.

Der Versuch zur Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Stickstoffbilanzsaldo enthält sowohl eine Stickstoffdüngungssteigerung mit Mineraldünger welche faktoriell mit Gülledüngung kombiniert wurde. Aus 7 Jahren mit konstant unterschiedlichem Düngerniveau ließen sich 748 Stickstoffauswaschungswerte berechnen.

## 2 Methodische Vorgehensweise

### 2.1 Datengrundlage

#### 2.1.1 Düngungsversuche

##### 2.1.1.1 Winterraps

Daten aus drei Versuchsserien (Exp. 1 - Exp. 3) bildeten die Grundlage für die vorliegende Analyse für Raps. In dem von der UFOP (Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e.V.) geförderten Projekt (Exp. 1) wurden in den Vegetationsperioden 2005/06 -2008/09 an bis zu 12 Standorten in verschiedenen Regionen Deutschlands (2009: Berge, Borwede, Futterkamp, Groß-Gerau, Gülzow, Hohenschulen, Kümchen, Moosburg, Nornborn, Ohrensen, Roda, Thyrow) N-Steigerungsversuche in Winterraps durchgeführt (2479 Parzellenergebnisse). Ziel war es, die N-Düngung von Winterraps unter Berücksichtigung der N-Aufnahme der Rapsbestände bis Vegetationsende im Herbst bzw. zu Vegetationsbeginn im Frühjahr zu optimieren und damit die Nachhaltigkeit des Winterrapsanbaus in Deutschland zu fördern (weitere Details siehe HENKE et al., 2009; SIELING et al., 2009). In jeder Umwelt wurde eine Variation der Herbstentwicklung durch zwei unterschiedliche Aussaattermine (normal vs. spät) und die Applikation von Stickstoff im Herbst (0 vs. 40 bzw. 80 kg N/ha) realisiert. Auf jeder dieser Saatzeit x Herbst-N-Kombination wurde in 4-facher Wiederholung die N-Düngung im Frühjahr gesteigert (0/0, 40/40, 80/80, 120/120 und 140/140 kg N/ha (zu Vegetationsbeginn/Schossen)), so dass je Umwelt und Herbstentwicklung eine separate Produktionsfunktion (s.u.) geschätzt werden konnte.

Eine zweite Versuchsserie (Exp. 2), die die Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe (FNR) finanziell förderte, wurde in den Jahren 2013-2015 auf 5 Standorten (Bornim, Dedelow, Ihinger Hof, Hohenschulen, Merbitz) in Deutschland durchgeführt (weitere Details siehe RÄBIGER, 2020; RÄBIGER et al., 2020). Im Fokus dieses Projekts stand die Minderung der Treibhausgasemissionen im Rapsanbau unter besonderer Berücksichtigung der N-Düngung. Auf allen Standorten unterblieb eine Herbst-N-Gabe; die N-Düngung im Frühjahr (4-fach wiederholt) wurde folgendermaßen gesteigert: 0/0, 30/30, 60/60, 90/90 und 120/120 kg N/ha (zu Vegetationsbeginn/Schossen).

Bei der dritten Versuchsserie handelt es sich um einen N-Steigerungsversuch, der auf dem Universitätsversuchsgut Hohenschulen seit 2016 durchgeführt wird. Neben zwei Herbst-N-Stufen (0 vs. 40 kg N/ha) wurden zur 1. und 2. Teilgabe (Vegetationsbeginn bzw. Schossen) jeweils 0, 40, 80 oder 120 kg N/ha und zur 3. Teilgabe (Blüte) 0 oder 40 kg N/ha ausgebracht. Alle N-Stufen wurden miteinander kombiniert, so dass für jede Herbst-N-Variante 32 unterschiedliche Frühjahrs-N-Varianten vorliegen, die sich in Menge und Verteilungsmuster (0/0/0 - 120/120/40 kg N/ha) unterscheiden.

In allen Versuchen wurden folgende Parameter erfasst: Samenertrag [t/ha bei 91 % TS], Ölkonzentration im Samen [% bei 91 % TS], Proteinkonzentration im Samen [% bei 100 % TS], Nmin (0-

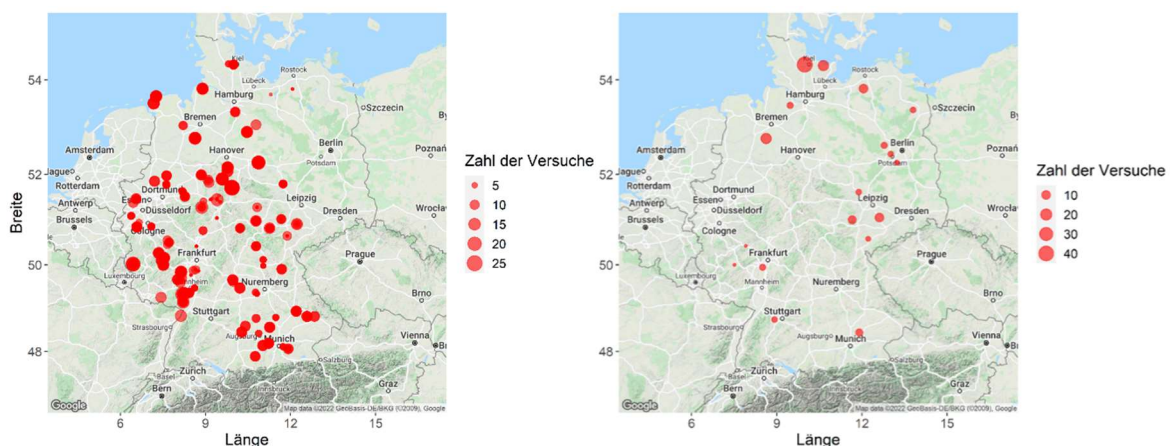


90 cm) zu Vegetationsbeginn. Die Parzellenerträge wurden mit einem Umrechnungsfaktor von 0,9 auf ein praxisübliches Ertragsniveau reduziert. In Exp. 1 fehlten in 8 Steigerungsreihen N<sub>min</sub>-Messungen. Diese wurde durch den Medianwert der vorhandenen Werte des gesamten Datensatzes ersetzt (28 kg N/ha). In Exp. 3 fand keine Untersuchung auf N<sub>min</sub> 0-90 im Frühjahr statt. Für diesen Datensatz wurde daher ein N<sub>min</sub>-Wert von 30 kg N/ha angenommen, der mit geringer Variation den für den Standort üblichen Wert für N<sub>min</sub> zu Vegetationsbeginn unter Winterraps darstellt.

Der gesamte Datensatz aus den drei Projekten umfasst 3331 Ertragsdaten (**Abbildung 1**). Im Datensatz fehlten 102 Protein- bzw. N-Konzentrationen für die jeweiligen Ertragsdaten. Diese fehlenden Daten wurden aus den Ölgehalten durch ein einfaches lineares Regressionsmodell geschätzt. Insgesamt konnten 132 N-Steigerungsreihen (Exp. 1: 107, Exp. 2: 15, Exp. 3: 10) in die Analyse aufgenommen werden. Ausgeschlossen wurden Datensätze, die keine oder keine sinnvolle (z. B. wegen extrem überhöhter N<sub>max</sub>-Werte) Schätzung von Ertragsfunktionen erlaubten.

### 2.1.1.2 Winterweizen

Der Gesamtdatensatz der Landwirtschaftskammern bzw. der Länderdienststellen aus den Bundesländern Thüringen, Nordrhein-Westfalen, Mecklenburg-Vorpommern, Rheinland-Pfalz, Hessen, Bayern, Sachsen-Anhalt, Baden-Württemberg, Niedersachsen und Schleswig-Holstein (**Abbildung 1**) umfasst 459 Versuche mit 4371 Werten von Kornertrag, Kornproteinkonzentration und N<sub>min</sub>-Frühjahr, in denen jeweils mindestens 4 verschiedene N-Stufen geprüft wurden (Details siehe RATJEN und KAGE, 2017). Neben den von den Länderdienststellen zur Verfügung gestellten Datensätzen wurden auch Daten eines N-Steigerungsversuches auf dem Versuchsgut Hohenschulen mit in die Auswertung einbezogen. Der Datensatz umfasst 140 Parzellenwerte aus den Jahren 2003 bis 2016. Die N-Düngung variierte zwischen 0 und 360 kg N/ha. Sofern verfügbar, wurden Einzelparzellenwerte verrechnet, in einer größeren Zahl von Versuchen lagen jedoch nur die Stufenmittel vor. Der Datensatz enthält N-Steigerungsversuche aus den Jahren 1987 bis 2016.



**Abbildung 1: Geographische Lage der Stickstoffsteigerungsversuche für Winterweizen (linke Karte) und Winterraps (rechte Karte).**

### 2.1.2 Stickstoffauswaschung

Der Zusammenhang zwischen Stickstoffbilanzüberschuss und Stickstoffauswaschung wurde anhand eines 8-jährigen Datensatzes untersucht, welcher am Standort Kiel-Hohenschulen im Rahmen des DFG-Sonderforschungsbereiches 192 erhoben wurde.

In einer Winterraps-Winterweizen-Wintergerste-Rotation wurden zwischen 1990/90 und 1998/99 in allen Früchten die Faktoren Bodenbearbeitung (pfluglos vs. gepflügt), Applikation von Schweinegülle (ohne, Herbst, Frühjahr, Herbst+Frühjahr; Ziel: 80 kg gesamt N/ha), 9 mineralische N-Düngungsstufen (0-240 kg N/ha) und Fungizideinsatz (ohne, optimal) geprüft. Die Behandlungsstufen lagen immer auf den gleichen Parzellen. Auf allen Parzellen wurden der Parzellenertrag und die N-Konzentration im Erntegut erhoben. In ausgewählten Parzellen (ohne Gülle, Gülle im Herbst, Gülle in Herbst und Frühjahr; 0, 120, 240 kg N/ha; beide Bodenbearbeitungs- und Fungizidvarianten) wurde während der Sickerwasserperioden 1991/92 - 1998/99 mithilfe von Saugkerzen Bodenwasser aus 150 cm Tiefe gewonnen und auf die Nitratkonzentration untersucht. Diese wurden zur Abschätzung der N-Auswaschung zwischen den Terminen linear interpoliert und mit Wasserflussraten multipliziert, die dem Pflanzenwachstumsmodell (HumeWheat, Ratjen & Kage, 2015) simuliert wurden. Aus dem N-Input (mineralische und organische N-Düngung) und dem N-Output (N-Entzug mit dem Erntegut) lässt sich für jede Parzelle eine N-Bilanz erstellen, die mit den geschätzten N-Auswaschungsverlusten in der nachfolgenden Sickerwasserperiode in Beziehung gesetzt wurde.

### 2.2 Funktionsformen

Für Weizen wurde die Ertragsreaktion auf das N-Angebot (N-Düngung + N<sub>min</sub> zu Vegetationsbeginn) analysiert. Da unter Raps die N<sub>min</sub>-Werte zu Vegetationsbeginn in der Regel auf einem niedrigen Niveau mit vergleichsweise geringer Varianz lagen und die Beziehungen zwischen N<sub>min</sub> und optimaler Stickstoffdüngungshöhe nicht signifikant waren, sondern zu insgesamt niedrigeren Bestimmtheitsmaßen bei der Beschreibung der Ertragsreaktion führten, wurde bei Raps der Effekt der Stickstoffdüngung im Frühjahr und nicht des N-Angebotes auf den Samenertrag analysiert. Für jede N-Steigerungsreihe wurden drei verschiedene Funktionen geprüft, wobei N<sub>ges</sub> bei Weizen das N-Angebot und bei Raps die Höhe der Frühjahrsdüngung bezeichnet:

#### 1. quadratische Funktion (Q)

$$\text{Ertrag, Öl, \%N} = a + b \cdot N_{\text{ges}} + c \cdot N_{\text{ges}}^2 \quad (1)$$

Steigerungsreihen mit positiven Werten für den Koeffizienten 'c' für das Merkmal Ertrag (ohne abnehmenden Ertragszuwachs) wurden aus der Analyse ausgeschlossen.

## 2. quadratisch-Plateau-Funktion (QP)

$$Ertrag = \begin{cases} quad \cdot (N_{ges} - N_{max})^2 + Y_{max} & N_{ges} \leq N_{max} \\ Y_{max} & N_{ges} > N_{max} \end{cases} \quad (2)$$

Diese Funktion ist nicht-linear und wurde daher mit der Funktion "nls" des Statistikpaketes R an die Daten jeder einzelnen N-Steigerungsreihe angepasst. Bei einer ganzen Reihe von N-Steigerungsreihen ist jedoch die Schätzung nur nach umfangreicher Variation der Startparameter möglich gewesen. Hierfür wurde die Prozedur "nlsLoop" (Padfield, 2021) genutzt, wobei jeweils 500 verschiedene Startwerte herangezogen wurden und nach dem AIC-Wert der beste Fit ausgewählt wurde.

## 3. Linear-Plateau-Funktion (LP)

$$Ertrag = \begin{cases} slope \cdot (N_{ges} - N_{max}) + Y_{max} & N_{ges} \leq N_{max} \\ Y_{max} & N_{ges} > N_{max} \end{cases} \quad (3)$$

Ertrag steht für den Samen- bzw. Kornertrag [t/ha bei 91 % TS (Raps) bzw. 86 % TS (Weizen)], Öl für die Ölkonzentration im Samen [% bei 91 % TS], %N für die N- bzw. Proteinkonzentration im Samen bzw. Korn [% bei 100 % TS] (%Protein = %N x 5,7 (Weizen) bzw. 6,25 (Raps)), Nges für die im Frühjahr applizierte N-Gesamtmenge bei Raps bzw. das N-Angebot (N-Düngung + Nmin) [kg N/ha], Nmax die für das Erreichen des maximalen Ertrags (Ymax = Ertragsplateau [t/ha]) notwendige N-Menge [kg N/ha].

Die Koeffizienten a, b, c, quad und slope wurden mithilfe der entsprechenden Prozeduren der Statistiksoftware R ('lm' für (1), 'nls' für (2) und (3)) ermittelt.

In der Literatur werden noch weitere Funktionsformen diskutiert, z. B. die Linear-Exponentielle Funktion (LEXP;  $y = a + b \cdot r^N + c \cdot N$ ), die insb. in Großbritannien häufig genutzt wird (SYLVESTER-BRADLEY und KINDRED, 2009; ADDY et al., 2020). Aus Gründen der Praktikabilität wurde dieser Ansatz hier aber nicht weiterverfolgt.

## 2.3 Betrachtung unterschiedlicher Szenarien

Neben der Funktionsform beeinflussen die Methodik der Ermittlung von Stickstoffdüngungsoptima (*ex post* vs. *ex ante*) sowie die Vorgaben der novellierten Düngeverordnung (DüV) die Höhe der optimalen N-Düngung und damit die Höhe der Erträge.

### 2.3.1 Bestimmung der *ex post* ökonomisch optimalen N-Düngung

Durch die Bestimmung der ökonomisch optimalen Düngungshöhe für jeden Einzelfall und die Mittelwertbildung der jeweiligen Nopt-Werte erhält man das sogenannte *ex post* Düngungsoptimum. Da es erst im Nachhinein bestimmt werden kann, ist es nur indirekt für die Bemessung einer optimalen Stickstoffdüngungshöhe geeignet. Hierzu kann es jedoch beitragen, indem Faktoren identifiziert werden, die vor der Düngung bekannt sind und einen Effekt auf die Lage des Düngungsoptimums aufweisen.

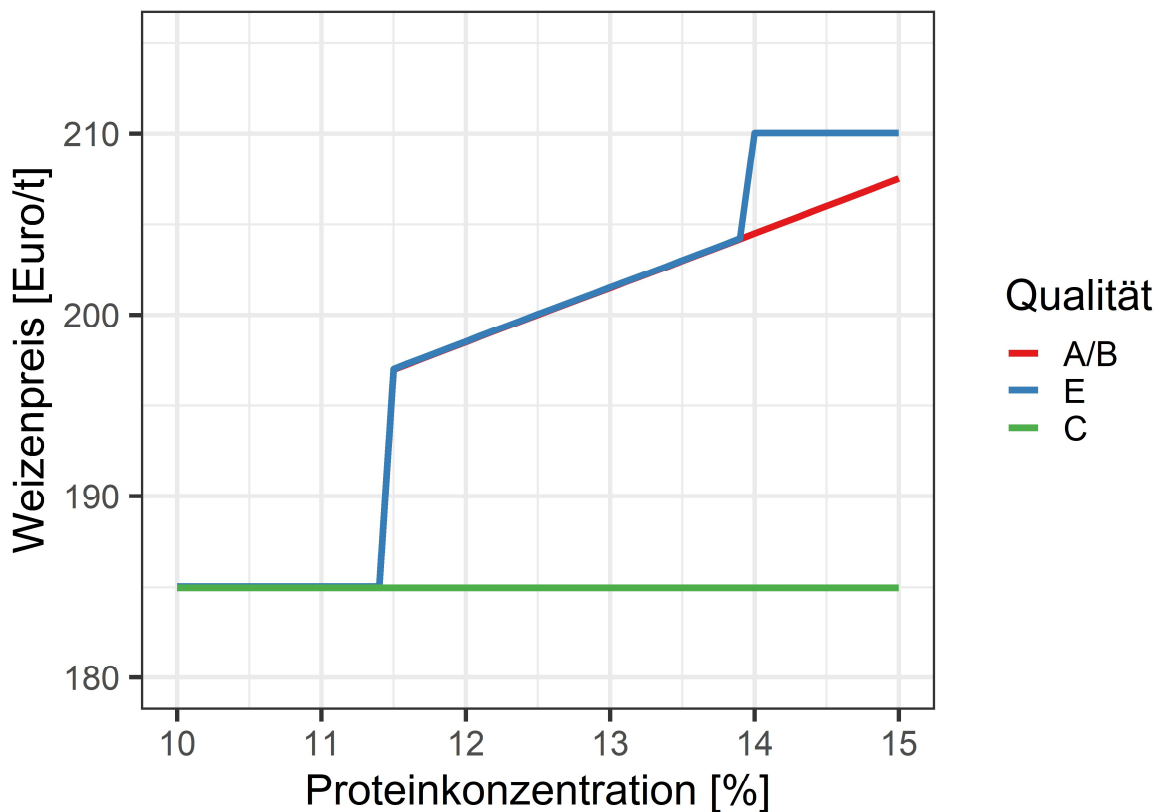
Für jede einzelne N-Steigerungsreihe wurde unter Verwendung der Funktionsparameter der QP-Funktionen für Ertrag, der Q-Funktion für Öl- bzw. Proteinkonzentration und der Beziehung zwischen Öl- bzw. Proteinkonzentration und Preis sowie unter Berücksichtigung der Kosten für Stickstoffdünger die ökonomisch optimale N-Frühjahrsdüngermenge berechnet, die zur jeweiligen maximalen N-Kosten freien Leistung (NKfL) führt.

$$NKfL = Ertrag(N_{ges}) \cdot Preis(\text{Öl bzw. Protein}(N_{ges})) - N_{ges} \cdot NPreis \quad (4)$$

Dabei wurden 500 EUR/t Raps und 0,90 EUR/kg N angenommen. Der Rapspreis wurde zudem in Abhängigkeit von der Ölkonzentration (bei 91 % TS) angepasst:

$$Preisanpassung = (\text{Ölkonzentration} - 40) \cdot 1,5/100 \cdot Grundpreis \quad (5)$$

Für Backweizen ist der am Markt erzielbare Preis eine Funktion der Proteinkonzentration und der Sortengruppe des angebauten Weizens. Im Rahmen der Berechnungen wurden für Backweizen (A/B-Qualität) ein Referenzproteinwert von 12,5 % und eine untere Schwelle von 11,5 % angenommen. Bei niedrigeren Proteinkonzentrationen wurde der Futterweizenpreis (185 EUR/t) verwendet. Ausgehend vom Referenzproteinwert und einem Referenzpreis für Backweizen (A/B Qualität) von 200 EUR/t erfolgte eine Preisanpassung von 3 EUR/t und %-Punkt Protein. Für Eliteweizen wurde bei Erreichen der Proteinschwelle von 14 % ein Preis von 210 EUR/t angenommen, bei Unterschreiten der Backweizenpreis entsprechend der erzielten Proteinkonzentration (**Abbildung 2**).



**Abbildung 2: Preise für unterschiedliche Qualitätsgruppen von Winterweizen als Funktion der Proteinkonzentration. Annahmen für die Auswertung der N-Steigerungsversuche.**

Die Produkt- und Stickstoffpreise unterliegen einer mehr oder weniger starken Dynamik, wobei sich häufig beide Preise in eine Richtung, aktuell sehr ansteigend, bewegen. Ausschlaggebend für die Lage des ökonomischen Optimums ist immer die Produktpreis-/Stickstoffpreisrelation. Diese schwankt häufig weniger als z. B. der Stickstoffpreis oder der Produktpreis für sich allein. Aktuell haben sie die Stickstoffpreise auf ein Rekordniveau über 2 €/kg N und somit um den Faktor 2,4 erhöht, wohin gehend die Produktpreise sich in etwa um den Faktor 1,5 gegenüber den Annahmen erhöht haben.

Zur Bestimmung des Optimums wurde die Funktion "optimize" des Statistikpaketes R verwendet (R Core Team, 2019). Bei der Bestimmung des ökonomisch optimalen Stickstoffangebotes wurde eine Obergrenze für den "optimalen" Wert entsprechend der Höhe des maximal geprüften Stickstoffdüngungsniveaus von Exp. 1 in Höhe von 280 kg N/ha gezogen, d.h. höher berechnete Optima wurden auf diesen Wert nach unten korrigiert.

Das o.g. Vorgehen erfolgte für die Funktionsformen 'Q' und 'QP'. Bei der LP-Funktion ist die Düngermenge, die zum Höchstertag führt (Nmax) gleich der ökonomisch optimalen Düngermenge, solange das Produkt aus linearem Anstiegsfaktor und Produktpreis kleiner als die Kosten je Einheit Stickstoffdünger ist.

### 2.3.2 Bestimmung der *ex ante* ökonomisch optimalen N-Düngung

Bei der Bestimmung der *ex ante* Optima wird eine über alle Versuche hin einheitliche N-Düngungshöhe gesucht, die in der Summe zur maximalen N-kostenfreien Leistung führt (BULLOCK und BULLOCK, 1994b).

$$\overline{NKFL} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{Ertrag}_i(\text{Nges}) \cdot \text{Preis}(\text{Öl bzw. Protein}(\text{nges})_i) - \text{Nges} \cdot \text{NPreis} \quad (6)$$

wobei 'i' für die einzelne N-Steigerungsreihe steht. Für die Berechnungen des *ex ante* Düngungsoptimums bei Raps bzw. Angebotsoptima bei Weizen wurde der Datensatz in Steigerungsversuche mit bzw. ohne Herbst-N-Düngung bei Raps und für die einzelnen Qualitätsgruppen bei Weizen aufgeteilt und das jeweilige Düngungsoptimum getrennt berechnet.

### 2.3.3 Bestimmung der N-Düngung ohne und mit Beachtung der Vorgaben der Düngeverordnung (DüV)

Nach Vorgaben der DüV wurde für jede der betrachteten N-Steigerungsreihen die Höhe der Frühjahrsdüngung berechnet. Hierbei wurde entsprechend der Vorgaben die Herbststickstoffdüngung bei Raps von der Höhe der Frühjahrsdüngung in Abzug gebracht. Für die Varianten, die durch eine spezielle Versuchsfrage 80 kg N/ha im Herbst erhalten hatten, wurden im Weiteren nur 60 kg N/ha berücksichtigt. Die Ertragskorrektur des Düngedarfswertes erfolgte nach den Formeln:

$$\text{Ertragskorrektur Raps} = \begin{cases} \min(40, (Y_{av} - 4)/0,5 \cdot 10) & \text{für } Y_{av} \geq 4 \\ (Y_{av} - 4)/0,5 \cdot 15 & \text{für } Y_{av} < 4 \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{Ertragskorrektur Weizen} = \begin{cases} \min(40, (Y_{av} - 8)/1,0 \cdot 10) & \text{für } Y_{av} \geq 8 \\ (Y_{av} - 8)/1,0 \cdot 15 & \text{für } Y_{av} < 8 \end{cases} \quad (8)$$

wobei  $Y_{av}$  für den Durchschnittsertrag steht. '4' bzw. '8' repräsentieren den Referenzertrag von 4 t/ha für Raps und 8 t/ha für Weizen und die Faktoren '10' bzw. '15' stehen für die Anpassung der Stickstoffdüngung in Relation zum Referenzertrag über bzw. unterhalb des Referenzertragsniveaus je 0,5 t/ha (Raps) bzw. 1 t/ha (Weizen) Ertragsdifferenz. Der Durchschnittsertrag wurde hierbei aus dem arithmetischen Durchschnittsertrag je Standort getrennt nach den Projekten ermittelt, da die Daten für vorhergehende Versuchsjahre nicht vorlagen. Der Stickstoffbedarfswert wurde nach DüV um max. 40 kg N/ha erhöht. Weiterhin wurden die in der DüV festgelegten Korrekturen für Vorfrüchte angewendet. Korrekturen für organische Düngung im Vorjahr wurden nicht angewendet, da für die

Versuchsstandorte keine Angaben hierzu vorlagen und die Versuche selbst ausschließlich mineralisch gedüngt wurden.

Die Berechnung der Düngewerte nach Düngeverordnung (BMEL 2017) (nachfolgend 'DüV' bezeichnet) erfolgte für jeden der Modellansätze getrennt, da sich jeweils leicht unterschiedliche Durchschnittserträge ergaben.

Für Nitrat belastete Gebiete nach § 13 DüV ('Rote Gebiete') ist eine Reduktion der Düngewerte pauschal um 20 % vorgeschrieben (nachfolgend 'DüV-20'). Die nach DüV errechneten Düngewerte wurden daher entsprechend reduziert.

## 2.4 Statistische Analyse

### 2.4.1 Parameter der Düngungsversuche

Für die statistische Analyse der Leistungsparameter Samen- bzw. Kornertrag, Öl- bzw. Proteinkonzentration, N-kostenfreie Leistung und Stickstoffbilanz wurde ein gemischtes Modell mit den fixen Faktoren Herbstdüngung und Düngungsszenario (Winterraps) bzw. Qualitätsgruppe und Düngungsszenario (Winterweizen) verwendet. Als Randomfaktor wurde in beiden Fällen „Jahr innerhalb Ort“ verwendet. Die Modellgleichung für den Parameter Ertrag  $Y_{ijk}$  lautet:

$$Y_{ijk} = \beta_0 + \beta_1 NH_{ijk} + \beta_2 DS_{ijk} + \beta_3 NH_{ijk} \cdot DS_{ijk} + ort_i + jahr_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (9)$$
$$ort_i \sim N(0, \sigma_{ort}^2), \quad jahr_{ij} \sim N(0, \sigma_{jahr}^2), \quad \varepsilon_{ijk} \sim N(0, \sigma^2)$$

wobei NH die Herbstdüngung (ohne/mit) und DS das Düngungsszenario (fixe Faktoren) bezeichnet. Analog wurden für die anderen Parameter des Winterweizens (Proteinkonzentration, N-Bilanz, N-Kosten freie Leistung) entsprechende Modelle verwendet, bei denen die Qualitätsgruppe als fixer Faktor in das Modell aufgenommen wurden. Für die Modellanpassung wurde die Funktion 'lmer' des Statistikpaketes 'lme4' in der freien Statistiksoftware R benutzt (BATES et al., 2015). Die Mittelwertvergleiche erfolgten unter Verwendung des Pakets emmeans (Lenth, 2021) sowie der Funktion cld (Piepho, 2004) aus dem Paket multcomp (Hothorn et al., 2008).

### 2.4.2 Stickstoffeffizienz und marginale Stickstoffeffizienz

Die Stickstoffeffizienz wurde als Quotient des Stickstoffentzuges durch Körner bzw. Samen und der Stickstoffdüngung berechnet, wobei bei Winterraps die Herbststickstoffdüngung mit maximal 60 kg N/ha angerechnet wurde. Diese Berechnung erfolgte auf dem jeweiligen Düngungsniveau der Szenarien.



Für die Bestimmung der marginalen Stickstoffeffizienz wurden zunächst an alles Stickstoffsteigerungsreihen von Winterraps und Winterweizen quadratische Funktionen zwischen Stickstoffentzug und Stickstoffdüngung im Frühjahr angepasst. Die marginale Stickstoffeffizienz wurde dann aus der Ableitung der ermittelten Funktion zur Stickstoffdüngung im Frühjahr ermittelt.

### 2.4.3 Stickstoffauswaschung

Die parzellenweise berechnete Stickstoffauswaschung wurde mit einem gemischten Modell (Funktion Imer, Bates et al. 2015) mit den fixen Faktoren Stickstoffbilanz (NBilanz), Gülledüngungsregime (Gülle: ohne, Herbst, Herbst + Frühjahr) und Fruchtart (Frucht: Raps, Weizen, Gerste) sowie dem Randomfaktor Jahr untersucht. Das volle Interaktionsmodell wurde durch Selektion nach dem Akaike-Informationskriterium um die nicht-signifikanten Effekte vereinfacht (Funktion "step", package ImerTest, Kuznetsova et al. 2017). Neben den fixen Haupteffekten N-Bilanz, Fruchtart und Gülledüngungsregime blieben die zweifach-Interaktionsterme Frucht:N-Bilanz + Gülle:NBilanz im finalen Modell enthalten.

## 3 Ergebnisse und Diskussion

### 3.1 Vergleich der Funktionsformen

Zur Beschreibung der Beziehung zwischen N-Düngung bzw. N-Angebot und Samen- bzw. Kornertrag wurden folgende Funktionsformen geprüft: Linear-Plateau (LP), Quadratisch-Plateau (QP) und Quadratisch (Q) (Abbildung 2).

Alle drei geprüften Funktionsformen (LP, QP, Q) waren in der Lage, im Durchschnitt aller Steigerungsreihen die Ertragsreaktion von Raps und Weizen ähnlich gut zu beschreiben, eine Beobachtung, die sich mit Ergebnissen aus der Literatur deckt (CERRATO und BLACKMER, 1990; MAKOWSKI et al., 1999). Allerdings wies das QP-Modell mit 0,32 t/ha (Winterraps) bzw. 0,185 t/ha (Winterweizen) den geringsten RMSE-Wert (Root Mean Square Error - mittlerer quadratischer Fehler) aller drei Modelle auf. Die Unterschiede waren zwar vergleichsweise gering, jedoch signifikant ( $P = 0,05$ ) (Tabelle 1). Daher ist davon auszugehen, dass das QP-Modell zur Beschreibung der N-Response von Winterraps den beiden anderen Ansätzen vorzuziehen ist, wie es auch schon von CERRATO und BLACKMER (1990) und BULLOCK und BULLOCK (1994b) für Körnermais gezeigt wurde. Das QP-Modell wurde im Folgenden auch für Winterweizen verwendet, da es bei gleicher Parameterzahl den geringeren RMSE-Wert im Vergleich zum Q-Modell aufwies (**Tabelle 1**).

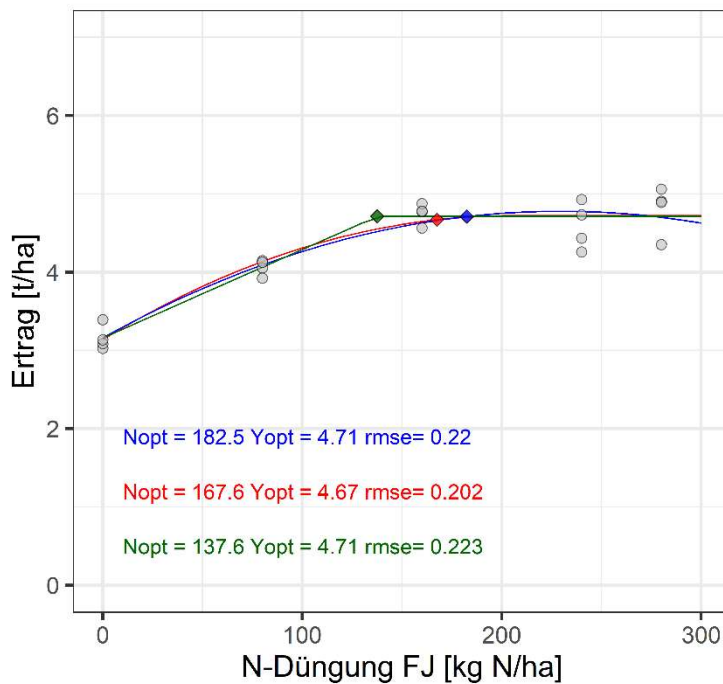


Abbildung 3: Beispiel für die drei geprüften Ertragsfunktionsformen 'Linear-Plateau' (grün), 'Quadratisch' (blau) und 'Quadratisch-Plateau' (rot) eines N-Steigerungsversuches in Winterraps (Borwede, 2008, Frühsaat, mit Herbst-N). Die grauen Kreise markieren die Datenpunkte, die Rauten die jeweilige ökonomisch optimale N-Menge. (FJ: Frühjahr)

Tabelle 1: 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 <sup>b#</sup>           | 0,185 <sup>b</sup>            |
| QP     | 0,316 <sup>c</sup> (-0,00382) | 0,184 <sup>b</sup> (-0,00122) |
| LP     | 0,324 <sup>a</sup> (+0,00385) | 0,204 <sup>a</sup> (+0,01840) |

# - gleiche Buchstaben bedeuten keine signifikanten Unterschiede bei P = 0,05 (RMSE: Root Mean Square Error - mittlerer quadratischer Fehler)

### 3.2 Bestimmung der optimalen N-Menge

Für Raps wurden die ökonomisch optimalen bzw. die nach der DüV maximal erlaubten N-Düngemengen getrennt für die Szenarien mit und ohne Herbst-N-Düngung mittels der drei unterschiedlichen Funktionsformen ermittelt (Abbildung 3), während für Weizen die Ergebnisse für die drei Qualitätsgruppen dargestellt werden (Abbildung 4). Die Stickstoffdüngungs- bzw.-angebotsoptima wiesen eine erhebliche Streubreite mit der höchsten Varianz bei dem ex post-Ansatz auf. Gleichzeitig

bestanden erhebliche Unterschiede im Hinblick auf das mittlere N-Düngungs- bzw. -Angebotsoptimum zwischen den Modellen.

Allerdings bedingt die Funktionsform auch systematische Effekte, die zu Fehlinterpretationen führen können (Bullock und Bullock, 1994a). Generell schätzt die LP-Funktion niedrigere  $N_{opt}$  (sowohl ex post als auch ex ante) als das Q- oder QP-Modell, diese Unterschiede sind jedoch bei ex ante-Betrachtung deutlich geringer als bei ex post-Betrachtung. Die LP-Funktion berechnet einen linearen Anstieg bis zum Erreichen eines Plateaus. Eine weitere Erhöhung des N-Angebots führt nicht zu einer Veränderung der Erträge. Die LP-Funktion wird von vielen Autoren als mathematische Beschreibung des Liebig-Gesetzes angesehen, was aber nach Paris (1992) nicht haltbar ist. Der gravierende Nachteil dieser Funktionsform ist der abrupte Bruch der Kurve an dem Punkt, der dann als maximale bzw. ökonomisch optimale N-Düngungshöhe definiert wird. Dieser Bruch in der Beziehung ist pflanzenphysiologisch nicht begründet (Nijland et al., 2008). Im Bereich vor dem Knickpunkt kommt es zu einer Überschätzung der Erträge und damit zu einer systematischen Unterschätzung des  $N_{opt}$  (Abbildung 2; Cerrato und Blackmer, 1990).

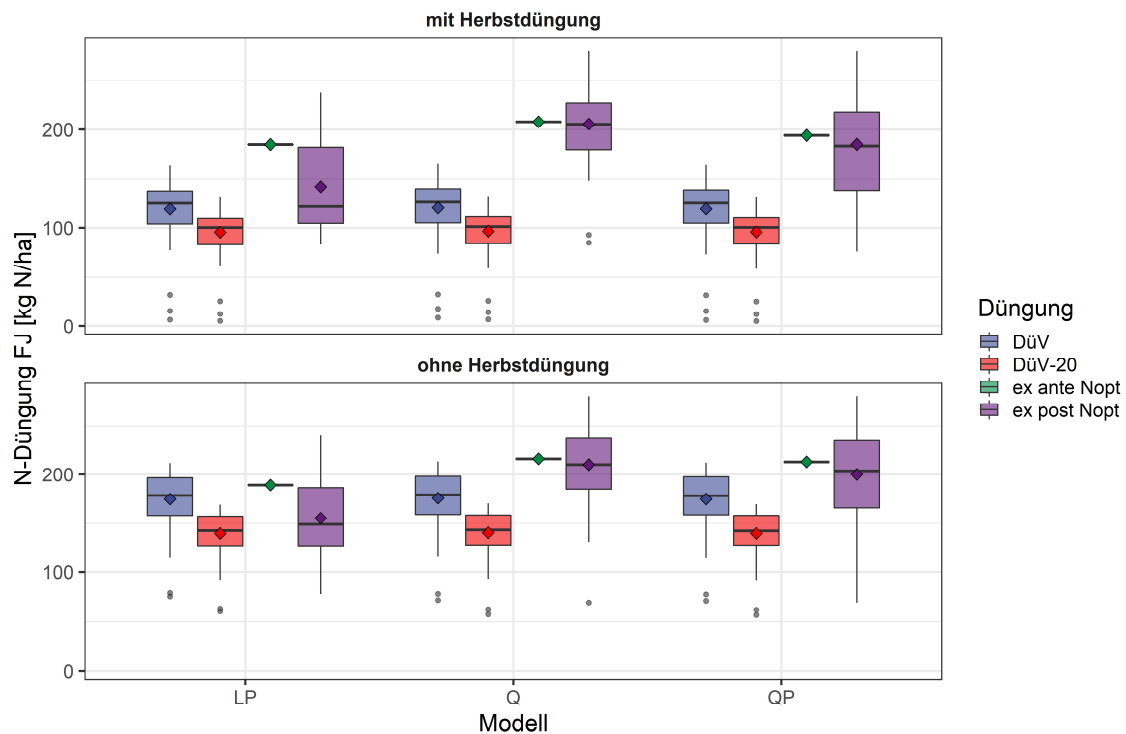
Demgegenüber unterstellt die quadratische Funktion (Q) einerseits eine mit zunehmender N-Düngung sinkende (Ertrags-) Wirksamkeit; andererseits wird angenommen, dass nach Überschreiten des Maximums der Ertrag wieder sinkt, eine Annahme, die meist nur in bestimmten Situationen (z.B. Lager) gerechtfertigt ist (Meyer-Aurich et al., 2019). Im Vergleich zu anderen Funktionsformen überschätzt die Q-Funktion bei ex post Anpassung in den meisten Fällen die optimale N-Düngermenge (Abbildung 2; Bullock und Bullock, 1994a; Bäckman et al., 1997; Smith et al. 2010), da die Steigung der Kurve kurz vor Erreichen von  $N_{opt}$  als zu steil berechnet wird (Cerrato und Blackmer, 1990). Die weite Verbreitung dieser Funktionsform (Meyer-Aurich et al. 2010) ist vermutlich auf die vergleichsweise einfache Handhabung zurückzuführen (Berechnung ohne spezielle Statistikprogramme möglich, keine Notwendigkeit Iterationsverfahren mit möglichen Konvergenzproblemen zu nutzen).

Die Quadratisch-Plateau-Funktion (QP) nimmt einen Ertragsanstieg bis zum Scheitelpunkt der quadratischen Funktion unter Berücksichtigung von abnehmenden Ertragszuwächsen mit steigender N-Düngung (abnehmender Grenznutzen) an, postuliert aber im Gegensatz zur Q-Funktion ab dem Scheitelpunkt einen konstanten Ertrag ( $Y_{max}$ ). In vielen Publikationen wird daher auch aus pflanzenphysiologischen Erwägungen die QP-Funktion als am geeignetsten zur Beschreibung der Ertragsreaktion auf eine steigende N-Düngung angesehen (Cerrato und Blackmer, 1990; Henke et al., 2007; Lyons et al., 2019; Nigon et al., 2019). **Abbildung 5** zeigt die Anpassung von Einzelfunktionen, die Ableitung der mittleren Optima und den Vergleich mit DüV Winterweizen anhand des QP-Modells.

Der ex post-Ansatz liefert im Mittel sowohl für Raps als auch für Weizen etwas niedrigere  $N_{opt}$ -Werte als der ex ante-Ansatz (Abbildungen 4 & 5, **Tabelle 2**), insbesondere die N-Bilanzüberschüsse sind jedoch niedriger (**Tabelle 3**), da gleichzeitig etwas höhere Erträge erzielt werden. Allerdings ist die

Bestimmung einer ex post ökonomisch optimalen Düngungshöhe insofern praxisfremd, als Landwirte in der Regel ihre Entscheidung über die Düngungshöhe ex ante, d.h. im Vorhinein vornehmen müssen, bzw. entsprechende gesetzliche Regelungen auch in aller Regel auf eine ex ante Bestimmung der Düngungshöhe abheben, d.h. eine Düngungsplanung im Vorhinein vorsehen. Darüber hinaus zeigten BULLOCK und BULLOCK (1994b), dass der ex post Ansatz nur dann zu belastbaren Aussagen zur Prognose der ökonomisch optimalen N-Düngermenge führt, wenn die Koeffizienten der Ertragsfunktionen für alle Steigerungsreihen identisch sind, was aber in der Regel nicht der Fall ist. **Abbildung 5** zeigt die große Variation der Lage der Ertragsfunktionen für Weizen am Beispiel der QP-Funktion. Trotzdem wird die Variante 'ex post Nopt' im Folgenden weiterhin mit betrachtet, da diese aufzeigt, welche Effekte eine jahresspezifisch angepasste, optimalen N-Düngung auf Düngungshöhe und Ertragsparameter hat.

Der hier verwendete, einfache ex ante-Ansatz schätzte einen einheitlichen Wert für die optimale N-Düngung aller Versuche innerhalb der Gruppen mit bzw. ohne Herbstdüngung. Die Düngewerte nach Vorgaben der Düngeverordnung (DüV) sind im Vergleich zu den Nopt-Werten des ex ante-Ansatzes deutlich geringer. Da nach der DüV eine Herbst-N-Düngung auf die im Frühjahr zur Verfügung stehende N-Menge angerechnet werden muss, dürfen für die hier geprüften Fälle im Frühjahr zu Raps nur max. 120 kg N/ha bzw. 96 kg N/ha in Roten Gebieten (DüV-20) ausgebracht werden. Die Herbstdüngung hatte nur einen geringen Effekt auf die Höhe der ökonomisch optimalen Stickstoffdüngung. Für die meisten Standorte des Datensatzes kann angenommen werden, dass im Herbst gedüngte Stickstoffmengen, die nicht von den Winterrapsbeständen aufgenommen werden, der Auswaschung unterliegen. Diese Annahme wird dadurch gestützt, dass insgesamt nur geringe Unterschiede in den Frühjahrs-Nmin-Werten zwischen den im Herbst gedüngten und nicht gedüngten Parzellen gefunden werden konnten (34 kg N/ha ohne Herbstdüngung, 40 bzw. 42 kg N/ha bei 40 bzw. 80 kg N/ha). Insofern kann auch die bei der Höhe der Frühjahrsdüngung verminderte Anrechnung der Herbststickstoffdüngung (60 statt 80 kg N/ha bei der 80 kg N/ha Variante) als eher konservativ angesehen werden.



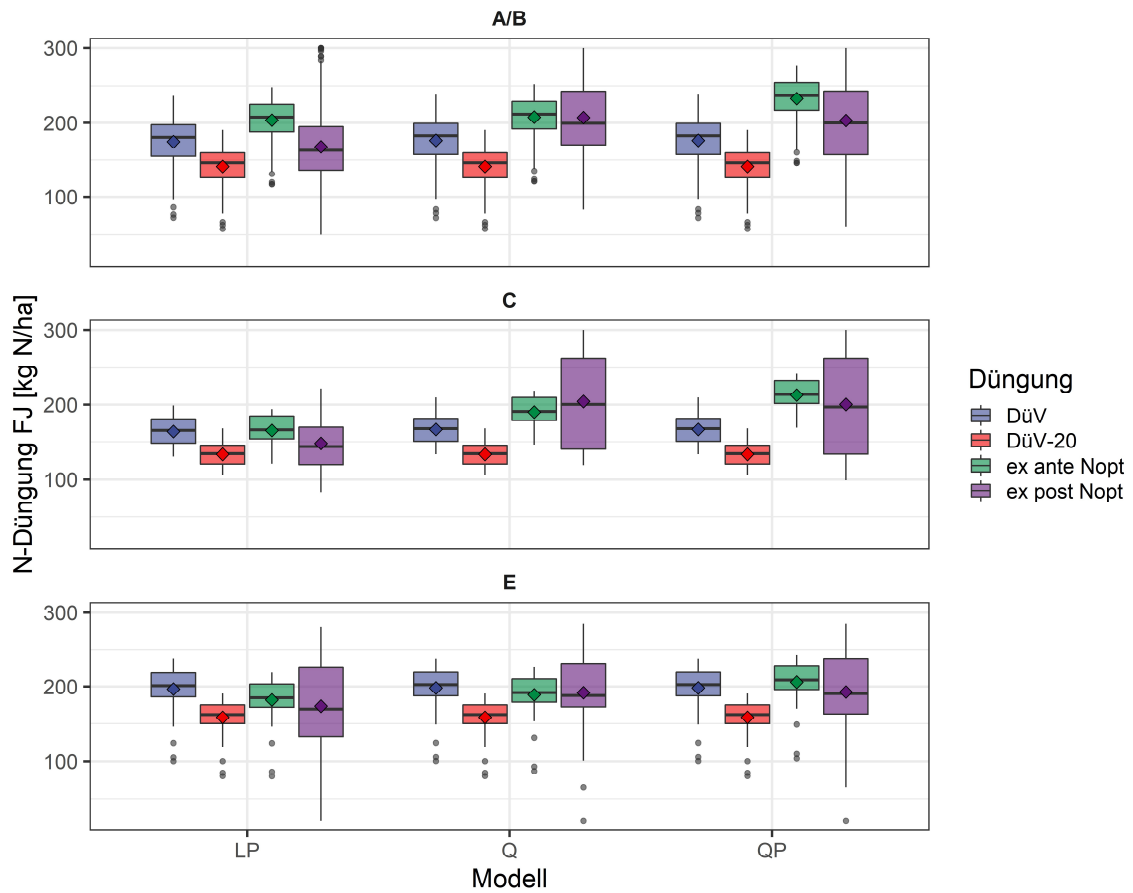
**Abbildung 4:** N-Düngungsoptima für Winterrapen auf der Grundlage unterschiedlicher Ertragsfunktionen (LP: Linear-Plateau-Modell, Q: quadratisches Modell, QP: quadratisch Plateau-Modell), getrennt nach Versuchen mit bzw. ohne Herbstdüngung (FJ: Frühjahr).

Beim Winterweizen nahm die optimale N-Angebotsmenge von der Qualitätsgruppe 'E' über 'A/B' zu 'C' bei allen Funktionsformen und Ansätzen ab (Abbildung 5). Die Vorgaben der DüV liegen je nach Funktionsform und Qualitätsgruppe um 12 - 51 kg N/ha niedriger als das ökonomische Optimum, wobei die Unterschiede zwischen ökonomisch optimaler Düngung und DüV beim E-Weizen am geringsten sind.

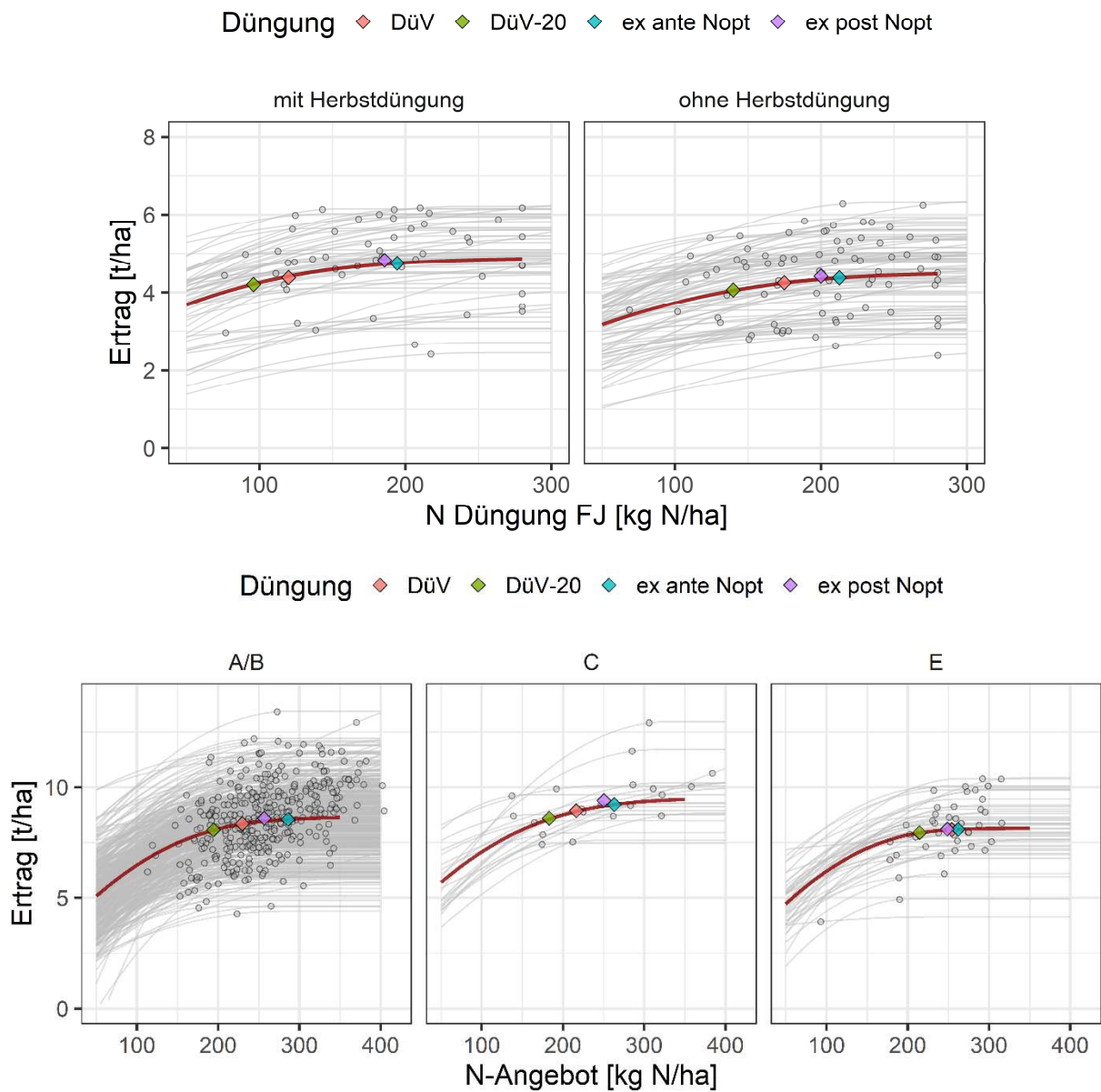
Sowohl bei Raps als auch bei Weizen berechnete der *ex ante*-Ansatz höhere N-Optima als der *ex post*-Ansatz (Ausnahme: Q-Modell bei 'E'- und 'C'-Qualitäten). Besonders große Differenzen traten bei der LP-Funktion aus (vgl. HENKE et al., 2007).

Setzt man das ökonomisch optimale N-Angebot (Weizen) bzw. die Frühjahrsdüngung (Winterrapen) nach *ex ante*-Ansatz als Referenz auf 100 %, ergeben sich die relativen N-Angebots- bzw. Düngungswerte (**Tabelle 2**). Bei Backweizen liegt der Relativwert nach DüV bei 80 % und bei Winterrapen ohne Herbstdüngung bei 82 %. Gegenüber einer allein ökonomisch ausgerichteten N-Düngung bewirkt die DüV demnach eine recht deutliche Einschränkung des Düngenniveaus für die beiden hier analysierten Kulturen. Im Vergleich zu anderen EU-Ländern bedeutet dies bereits eine strengere Reglementierung der Stickstoffdüngung. In Dänemark betrug die maximale Reduktion der Bedarfswerte in Relation zum ökonomischen Optimum 20 %; diese Reglementierung wurde

zwischenzeitlich aber wieder vollständig aufgehoben und durch alternative Maßnahmen zum Grundwasserschutz, z. B. Zwischenfruchtanbau ersetzt (Tendler, 2020).



**Abbildung 5: N-Optima (N-Angebot = N-Düngung + Nmin zu Vegetationsbeginn) für Winterweizen der Qualitätsgruppen A/B, C und E auf der Grundlage unterschiedlicher Funktionsformen (LP: Linear-Plateau-Modell, Q: quadratisches Modell, QP: quadratisch Plateau-Modell, FJ: Frühjahr).**



**Abbildung 6: Angepasste quadratisch-Plateau-Funktionen (grau), deren Median (rot), für Stickstoffsteigerungsversuche mit Winterweizen mit und ohne Herbst-N-Düngung (oben) sowie Winterweizen für die Qualitätsgruppen Backweizen, Futterweizen und Eliteweizen (unten). Farbige Symbole bezeichnen die Düngungswerte nach Düngeverordnung (DüV), um 20 % reduzierte Düngung nach DüV (DüV-20 %) sowie die ökonomischen ex ante und ex post Optima, graue Symbole die jeweiligen ex post Optima der einzelnen Versuche (FJ: Frühjahr).**



**Tabelle 2: Relativwerte der N-Angebots-/N-Düngungshöhe zu Winterraps und Winterweizen (100 % = ökonomisch optimale Düngung *ex ante*)**

|                     | 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 %        |
| <i>ex post</i> Nopt | 95 %         | 90 %         | 95 %       | 94 %          | 96 %         |
| DüV                 | 97 %         | 80 %         | 82 %       | 82 %          | 62 %         |
| DüV-20              | 82 %         | 68 %         | 70 %       | 66 %          | 49 %         |

### 3.3 Ertrag, Qualität, NKfL, Stickstoffeffizienz und N-Bilanz bei Nopt für ausgewählte Szenarien

Auf Basis der mit dem QP-Ansatzes abgeleiteten ökonomisch optimalen N-Mengen lassen sich die Auswirkungen verschiedener Szenarien (mit und ohne Herbst-N-Düngung, Qualitätsgruppen, *ex post* vs. *ex ante* Berechnung, Vorgaben der DüV allgemein und in Roten Gebieten im speziellen) auf die Zielparameter Ertrag, Ölkonzentration, N-Kosten freie Leistung, Stickstoffeffizienz, marginale Stickstoffeffizienz und N-Bilanz ableiten (**Tabelle 3**). Mit Ausnahme der Stickstoffeffizienz (höhere Werte bei niedrigerer Düngung) und der N-Bilanz (niedrigere Werte bei *ex post*) und der NKfL (N-Kosten freie Leistung) im Weizen (höherer Wert bei *ex post*) unterschieden sich der *ex ante* und *ex post* Ansatz bei den meisten Parametern nicht signifikant.

Generell führen die Szenarien mit niedrigeren N-Gaben beim Winterraps zu höheren Ölkonzentrationen, jedoch auch zu signifikant niedrigeren Erträgen (Tabelle 3). Die Stickstoffeffizienz für Winterraps ist mit 80% in der Szenario DüV-20% am höchsten und bei *ex ante* ökonomisch optimaler Düngung mit 56% am niedrigsten. In diesem Szenario liegt die marginale Stickstoffeffizienz nur noch bei 15% d.h. jedes zusätzliche kg gedüngter Stickstoff trägt zu 85% zur Erhöhung des Bilanzsaldos bei und nur 15% werden zusätzlich in das Ernteprodukt eingelagert und exportiert.

Das Niveau der N-Bilanzüberschüsse ist bei Winterraps bei ökonomisch optimaler Stickstoffdüngung (*ex ante* und *ex post*) vergleichsweise hoch. Die N-Salden und die Stickstoffeffizienzwerte welche bei Winterraps bei ökonomisch optimaler Stickstoffdüngung erzielt werden, legen nahe, dass eine Bemessung der Düngung ausschließlich nach ökonomischen Gesichtspunkten wegen - hier nicht näher quantifizierter - externer Kosten (Nitratauswaschung, THG-Emissionen) gesamtgesellschaftlich nicht sinnvoll ist, bzw. es der Begleitung durch gezielte pflanzenbauliche Maßnahmen (z. B. Zwischenfruchtanbau nach Raps) bedarf, damit solche Düngungsintensitäten vertretbar sind.

Eine Applikation von Stickstoff im Herbst führte bei nicht durch die DüV begrenzten N-Düngungsmengen zu Mehrerträgen und auch zu Mehrerlösen, allerdings auch zu höheren N-Resten nach der Ernte (Tabelle 3). Da die Ertragswirkung einer N-Düngung im Herbst geringer als die einer Frühjahrsapplikation ist, die Herbst-N-Menge aber gemäß DüV bei der im Frühjahr zur Verfügung

stehende N-Menge vollständig berücksichtigt werden muss, wird in aller Regel unter Bedingungen der DüV die N-Herbstgabe nicht wirtschaftlich sein. Vor diesem Hintergrund sollte eine Herbst-N-Düngung nur in Ausnahmefällen (z. B. pfluglose Bestellung, insb. nach Weizen) in Erwägung gezogen werden (SIELING und KAGE, 2010), zumal bei der Berechnung der NKfL die Kosten einer zusätzlichen Überfahrt für die Herbst-N-Gabe nicht berücksichtigt wurden.

Gegenüber dem Szenario ohne Restriktionen (*ex ante*, mit Herbsdüngung) minderten sich durch die Vorgaben der DüV (DüV, ohne Herbsdüngung) die monetären Erlöse um 4 % (-86 €/ha), bei jedoch gleichzeitig starker Senkung der N-Überschüsse um 64 kg N/ha.

**Tabelle 3: Effekte der Düngungsszenarien auf die Parameter Ertrag [t/ha], Ölkonzentration [%], N-kostenfreie Leistung [NKfL; EUR/ha] und Stickstoffbilanz [kg N/ha] von Winterraps bei ökonomisch optimaler N-Düngung (Nopt) geschätzt mittels QP-Funktion. (n = 132)**

| Parameter                    | Herbst-N-Düngung | Szenario                        |                                |                                 |                                |
|------------------------------|------------------|---------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
|                              |                  | <i>Ex ante</i><br>Nopt          | <i>Ex post</i><br>Nopt         | DüV                             | DüV-20                         |
| Samenertrag [t/ha]           | mit              | 4,42 <sup>a</sup> <sub>A</sub>  | 4,50 <sup>a</sup> <sub>A</sub> | 4,05 <sup>b</sup> <sub>A</sub>  | 3,88 <sup>c</sup> <sub>A</sub> |
|                              | ohne             | 4,22 <sup>ab</sup> <sub>B</sub> | 4,26 <sup>a</sup> <sub>B</sub> | 4,10 <sup>b</sup> <sub>A</sub>  | 3,91 <sup>c</sup> <sub>A</sub> |
| N-Bilanz<br>[kg N/ha]        | mit              | 118 <sup>a</sup> <sub>A</sub>   | 108 <sup>a</sup> <sub>A</sub>  | 60 <sup>b</sup> <sub>A</sub>    | 43 <sup>c</sup> <sub>A</sub>   |
|                              | ohne             | 84 <sup>a</sup> <sub>B</sub>    | 71 <sup>b</sup> <sub>B</sub>   | 54 <sup>c</sup> <sub>A</sub>    | 27 <sup>d</sup> <sub>B</sub>   |
| N-Effizienz [%]              | mit              | 56 <sup>d</sup> <sub>B</sub>    | 62 <sup>c</sup> <sub>B</sub>   | 72 <sup>b</sup> <sub>A</sub>    | 79 <sup>a</sup> <sub>A</sub>   |
|                              | ohne             | 60 <sup>c</sup> <sub>A</sub>    | 69 <sup>b</sup> <sub>A</sub>   | 71 <sup>b</sup> <sub>A</sub>    | 82 <sup>a</sup> <sub>A</sub>   |
| marginale<br>N-Effizienz [%] | mit              | 15 <sup>d</sup> <sub>B</sub>    | 19 <sup>c</sup> <sub>A</sub>   | 27 <sup>b</sup> <sub>A</sub>    | 31 <sup>a</sup> <sub>A</sub>   |
|                              | ohne             | 17 <sup>c</sup> <sub>A</sub>    | 20 <sup>b</sup> <sub>A</sub>   | 21 <sup>b</sup> <sub>B</sub>    | 26 <sup>a</sup> <sub>B</sub>   |
| NKfL<br>[EUR/ha]             | mit              | 2041 <sup>a</sup> <sub>A</sub>  | 2095 <sup>a</sup> <sub>A</sub> | 1947 <sup>b</sup> <sub>A</sub>  | 1887 <sup>b</sup> <sub>A</sub> |
|                              | ohne             | 1971 <sup>ab</sup> <sub>B</sub> | 2007 <sup>a</sup> <sub>B</sub> | 1955 <sup>ab</sup> <sub>A</sub> | 1904 <sup>b</sup> <sub>A</sub> |
| Ölkonzentration [%]          | mit              | 41,4 <sup>b</sup> <sub>A</sub>  | 41,6 <sup>b</sup> <sub>A</sub> | 42,2 <sup>a</sup> <sub>A</sub>  | 42,5 <sup>a</sup> <sub>A</sub> |
|                              | ohne             | 41,5 <sup>c</sup> <sub>A</sub>  | 41,7 <sup>c</sup> <sub>A</sub> | 42,0 <sup>b</sup> <sub>B</sub>  | 42,4 <sup>a</sup> <sub>A</sub> |

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

Eine Reduzierung der N-Düngung um weitere 20 % (DüV-20), wie es für die Nitrat-Kulisse (Rote Gebiete) vorgeschrieben ist, verminderte dagegen den Ertrag in dem Szenario ohne Herbsdüngung gegenüber der Referenz *ex ante* Nopt/mit Herbsdüngung um 11 % auf 3,91 t/ha und die Erlöse um

7 % bzw. 137 EUR/ha. Die N-Überschüsse werden dabei gleichzeitig um 91 kg N/ha auf 27 kg N/ha deutlich vermindert.

Wie beim Raps reduzierte eine Düngung nach DüV die Erträge sowie die Kornproteinkonzentration von Weizen in den Qualitätsgruppen A/B und C. Durch die höheren Bedarfswerte der DüV für Eliteweizen ergaben sich für diese Qualitätsgruppe keine vergleichbaren Effekte. Als Vergleichswert wurde hierbei und im Folgenden wieder der Wert des Szenarios 'ex ante Nopt' herangezogen. Die Erlöseinbußen lagen mit -17 (A/B-Weizen) bzw. -9 (C-Weizen) EUR/ha auf einem geringen Niveau. Bei E-Weizen trat durch die in der DüV definierten Bedarfswerte keine Reduktion der NKfL auf. Die Erträge nahmen bei Düngung nach DüV nur leicht ab, beim Backweizen wurden jedoch bereits geringere Proteinkonzentration berechnet, die dennoch im Mittel noch bei ausreichend hohen Werten lagen. Die Stickstoffeffizienz bzw. die marginale Stickstoffeffizienz liegt bei Düngung nach DüV außer für E-Weizen deutlich über 90% (Tabelle 4), die marginale N-Effizienz im Bereich von 41 bis 46%. Gleichzeitig sinken durch die DüV-reglementierte Düngung die N-Überschüsse von 58 auf 16 (A/B-Weizen) bzw. von 38 auf 7 (C-Weizen) kg N/ha. Insofern kann ohne tiefergehende Betrachtung, für die Düngung von Backweizen nach DüV eine recht günstige Relation zwischen ökonomischen Zielen und Vermeidung externer Kosten angenommen werden.

Eine weitere Reduzierung der N-Düngung um 20 %, wie in den „Roten Gebieten“ vorgeschrieben, minderte die N-Kosten freien Leistungen (NKfL) um 67 (A/B-Weizen), 42 (C-Weizen) bzw. 28 EUR/ha (E-Weizen) (Tabelle 4). Dabei spielten neben den Mindererträgen insbesondere das Nichterreichen der Proteinkonzentration für die entsprechenden Qualitätsstufen (Proteinminderung: 'E' -1,0 %, 'A/B' -1,5 %) eine Rolle. Die Reduktion der Stickstoffdüngung auf das Niveau DüV-20% führt zu Stickstoffeffizienzen von über 100% und die marginale Stickstoffeffizienz steigt auf über 50%. Die N-Bilanz war in dem Szenario DüV-20 ausgeglichen bis leicht negativ (2 bis -13 kg N/ha).

**Tabelle 4: Effekte der Düngungsszenarien auf die Parameter Ertrag [t/ha], Proteinkonzentration [%], Stickstoffbilanz [kg N/ha] und N-kostenfreie Leistung (NKFL [Euro/ha]) von Winterweizen bei ökonomisch optimaler N-Düngung geschätzt mittels einer quadratischen Platteau-Funktion (n = 1448).**

| Parameter                 | Qualitätsgruppe | Szenario                        |                                 |                                 |                                 |
|---------------------------|-----------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
|                           |                 | Ex post Nopt                    | Ex ante Nopt                    | DüV                             | DüV-20                          |
| Kornertrag [t/ha]         | A/B             | 8,47 <sup>a</sup> <sub>A</sub>  | 8,42 <sup>a</sup> <sub>A</sub>  | 8,22 <sup>b</sup> <sub>A</sub>  | 7,94 <sup>c</sup> <sub>A</sub>  |
|                           | C               | 8,92 <sup>a</sup> <sub>AB</sub> | 8,74 <sup>a</sup> <sub>AB</sub> | 8,46 <sup>b</sup> <sub>A</sub>  | 8,12 <sup>c</sup> <sub>A</sub>  |
|                           | E               | 8,15 <sup>a</sup> <sub>B</sub>  | 8,14 <sup>a</sup> <sub>B</sub>  | 8,13 <sup>a</sup> <sub>A</sub>  | 7,98 <sup>a</sup> <sub>A</sub>  |
| Kornprotein [%]           | A/B             | 13,4 <sup>b</sup> <sub>B</sub>  | 13,7 <sup>a</sup> <sub>B</sub>  | 12,8 <sup>c</sup> <sub>B</sub>  | 12,2 <sup>d</sup> <sub>B</sub>  |
|                           | C               | 12,5 <sup>a</sup> <sub>bc</sub> | 12,5 <sup>a</sup> <sub>C</sub>  | 11,8 <sup>b</sup> <sub>C</sub>  | 11,3 <sup>c</sup> <sub>C</sub>  |
|                           | E               | 14,0 <sup>a</sup> <sub>A</sub>  | 14,1 <sup>a</sup> <sub>A</sub>  | 14,0 <sup>a</sup> <sub>A</sub>  | 13,1 <sup>b</sup> <sub>A</sub>  |
| N-Bilanz [kg N/ha]        | A/B             | 30 <sup>b</sup> <sub>A</sub>    | 58 <sup>a</sup> <sub>B</sub>    | 16 <sup>c</sup> <sub>A</sub>    | -7 <sup>d</sup> <sub>A</sub>    |
|                           | C               | 22 <sup>ab</sup> <sub>A</sub>   | 38 <sup>a</sup> <sub>AB</sub>   | 7 <sup>b</sup> <sub>AB</sub>    | -13 <sup>c</sup> <sub>A</sub>   |
|                           | E               | 21 <sup>b</sup> <sub>A</sub>    | 34 <sup>a</sup> <sub>A</sub>    | 28 <sup>a</sup> <sub>B</sub>    | 2 <sup>c</sup> <sub>A</sub>     |
| N-Effizienz [%]           | A/B             | 91,2 <sup>b</sup> <sub>A</sub>  | 76,7 <sup>c</sup> <sub>A</sub>  | 93,8 <sup>b</sup> <sub>A</sub>  | 107,8 <sup>a</sup> <sub>A</sub> |
|                           | C               | 94,5 <sup>b</sup> <sub>AB</sub> | 82,6 <sup>b</sup> <sub>A</sub>  | 96,5 <sup>b</sup> <sub>A</sub>  | 110,2 <sup>a</sup> <sub>A</sub> |
|                           | E               | 101,8 <sup>a</sup> <sub>B</sub> | 85,6 <sup>b</sup> <sub>A</sub>  | 88,3 <sup>b</sup> <sub>A</sub>  | 102,1 <sup>a</sup> <sub>A</sub> |
| Marginale N-Effizienz [%] | A/B             | 44,0 <sup>b</sup> <sub>A</sub>  | 31,5 <sup>c</sup> <sub>A</sub>  | 44,3 <sup>b</sup> <sub>A</sub>  | 51,8 <sup>a</sup> <sub>A</sub>  |
|                           | C               | 47,4 <sup>ab</sup> <sub>A</sub> | 39,6 <sup>b</sup> <sub>AB</sub> | 46,1 <sup>ab</sup> <sub>A</sub> | 49,5 <sup>a</sup> <sub>A</sub>  |
|                           | E               | 43,6 <sup>b</sup> <sub>A</sub>  | 39,5 <sup>b</sup> <sub>B</sub>  | 41,1 <sup>b</sup> <sub>A</sub>  | 48,8 <sup>a</sup> <sub>A</sub>  |
| NKFL [Euro/ha]            | A/B             | 1534 <sup>a</sup> <sub>A</sub>  | 1499 <sup>b</sup> <sub>A</sub>  | 1482 <sup>c</sup> <sub>A</sub>  | 1432 <sup>d</sup> <sub>A</sub>  |
|                           | C               | 1482 <sup>a</sup> <sub>A</sub>  | 1436 <sup>a</sup> <sub>A</sub>  | 1427 <sup>ab</sup> <sub>A</sub> | 1394 <sup>b</sup> <sub>A</sub>  |
|                           | E               | 1518 <sup>a</sup> <sub>A</sub>  | 1485 <sup>a</sup> <sub>A</sub>  | 1485 <sup>a</sup> <sub>A</sub>  | 1457 <sup>b</sup> <sub>A</sub>  |

# - gleiche Kleinbuchstaben bedeuten keine signifikanten Unterschiede bei P = 0,05 je Merkmal innerhalb der Qualitätsgruppe, gleiche Großbuchstaben bedeuten keine Unterschiede der Qualitätsgruppen innerhalb eines Düngungsszenario

Bei dem Parameter Kornertrag wurde eine signifikante Interaktion (P < 0,05) zwischen dem Szenario und der Qualitätsgruppe festgestellt.

Die Szenarienanalyse zeigt, dass sowohl bei Raps als auch bei Weizen die N-Bedarfswerte, welche die DüV vorgibt, deutlich niedriger (Ausnahme E-Weizen) liegen als die *ex ante* geschätzten Nopt-Werte (**Abbildung 4, Abbildung 5**). Die negativen Auswirkungen auf Ertrag, Qualität und monetären Erlös sind aber als gering (Winterweizen) bis merklich (Winterraps) einzuschätzen, während die N-Überschüsse deutlich reduziert werden (**Tabelle 3**). Als Folge der DüV wird es ggf. zu einer gewissen Verringerung der Proteinkonzentration beim Weizen kommen, die sich negativ auf die Auszahlungspreise und ggf. die Backqualität auswirken könnte. Zwar wird zunehmend diskutiert, dass weniger die Proteinkonzentration an sich als vielmehr die Funktionalität der Proteinfraction für das Backergebnis relevant ist (Rossmann et al., 2019). Allerdings gilt auch zu berücksichtigen, dass ein nicht unbeträchtlicher Teil des deutschen Weizens in den Export geht und dort in der Regel Vorgaben für

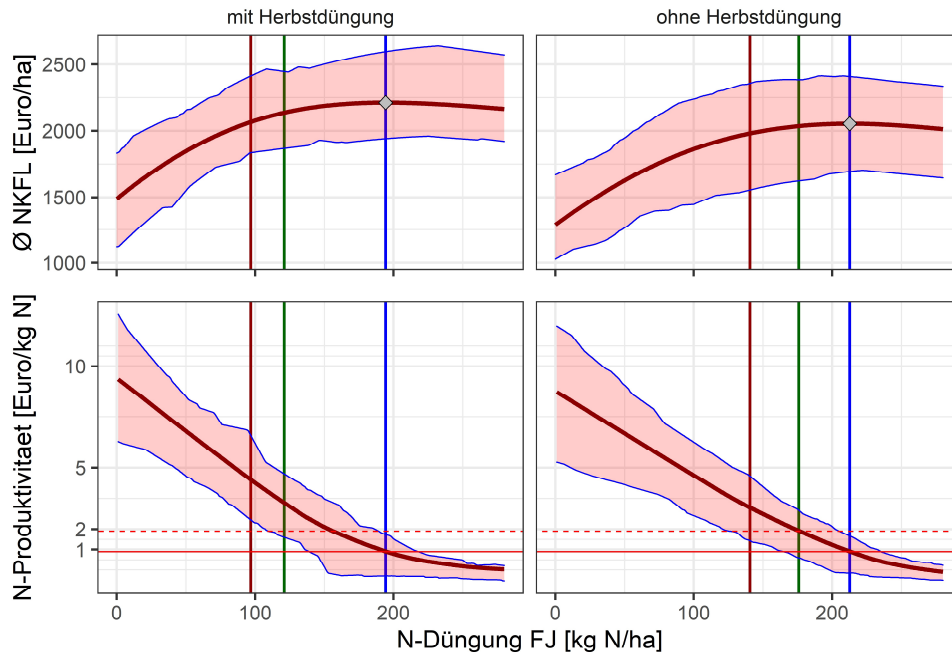
eine Mindestproteinkonzentration (häufig 12,5 %) gemacht werden, die aufgrund der Limitierungen der DüV nicht immer sicher erreicht werden können.

Die Absenkung der Rohproteinkonzentration infolge der Anpassung der Düngung nach DüV 2017 bzw. bei weiterer Reduktion der Düngung um 20 % gegenüber dem ökonomischen Optimum beträgt nach den Ergebnissen dieser Analyse rund 0,5 % (DüV) bzw. 1 % (DüV-20 %). Bei ca. 3 Mio. Hektar Anbaufläche für Winterweizen in Deutschland und einem gerundeten Durchschnittsertrag von 8 t/ha (bei 86% TS) entspricht eine Verringerung der Rohproteinkonzentration um 0,5 % einer Rohproteinmenge von ca. 100.000 t. Bei einem Kornertrag 3.5 t/ha Körnererbsen mit 20 % Rohprotein entspricht dies einer notwendigen Fläche von 170.000 ha zur Erzeugung der äquivalenten Rohproteinmenge. Ökonomisch betrachtet entsprechen 0,5% Proteinabsenkung bei 4,70 €/t Weizen und Prozent Proteindifferenz) (KNUDSEN, 2016) etwa 50 Mio. Euro und Jahr.

Eine Verringerung der N-Düngung um weitere 20 % gegenüber der DüV (DüV-20) hat dagegen deutliche Auswirkungen auf die Erträge, Qualitäten und Erlössituation (**Tabelle 3**). Zwar werden gleichzeitig die N-Bilanzüberschüsse weiter reduziert, führten aber beim Weizen sogar zu negativen Werten und N-Effizienzen von über 100%.

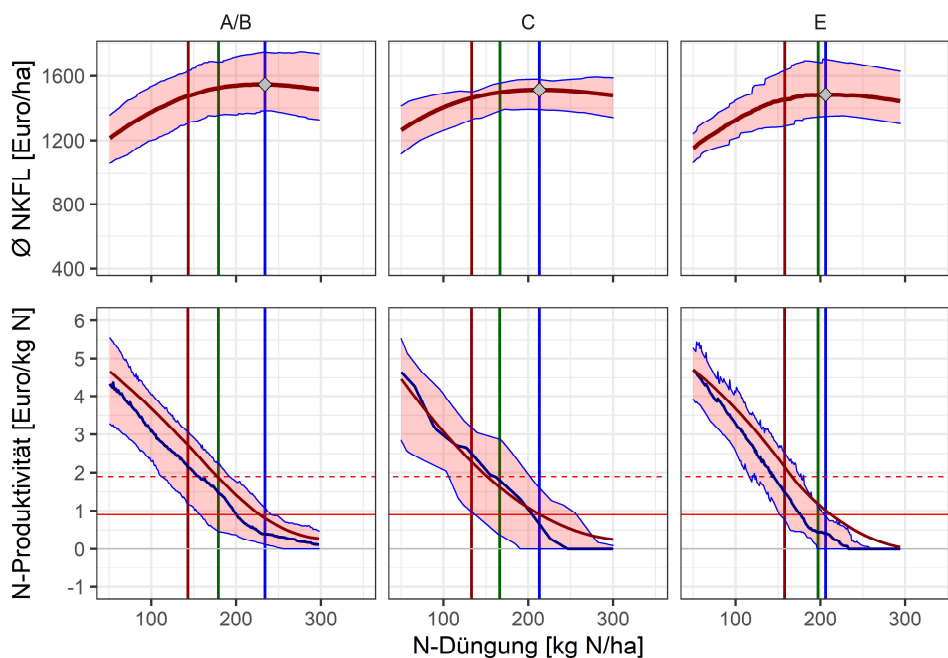
### 3.4 *Ex ante* Produktionsfunktion und Grenznutzen der Stickstoffdüngung

Bei der *ex ante* Betrachtung ergibt sich durch die Überlagerung der einzelnen Produktionsfunktionen der einzelnen N-Steigerungsreihen eine mittlere N-Kosten freie Leistung (NKfL), die beim ökonomischen *ex ante* Optimum im Maximum liegt (oberer Teil der Abbildungen 6 und 7). In den unteren Teilen der Abbildungen 6 und 7 ist die Grenzproduktivität (Ableitung der Funktion für NKfL), also die Wirkung eines zusätzlich applizierten kg Stickstoff, auf die NKfL dargestellt. Bei ökonomisch optimaler N-Düngung (blaue Linie) entspricht die Grenzproduktivität definitionsgemäß dem Preis für Stickstoff (ohne Ausbringungskosten) (wegen 'Sprüngen' in den Kurven für E- und A/B-Qualitäten bei Weizen die durch die unterschiedlichen Preise je nach Erreichung der Qualitätsniveaus bedingt sind, sind für Weizen geglättete Kurven dargestellt). Es wird deutlich, dass für Raps und Backweizen die Grenzproduktivität des Stickstoffs bei Düngung nach DüV deutlich über dem angenommenen Marktpreis für Stickstoff (0,90 EUR/kg N) liegt.



**Abbildung 7: N-Kosten freie Leistung und N-Grenzproduktivität für Winterraps mit und ohne Herbst-N-Düngung. Blaue senkrechte Linie: ex ante Nopt, grüne senkrechte Linie: erlaubtes Düngenniveau nach DüV, rote senkrechte Linie: erlaubtes Düngenniveau nach DüV -20 % (Rote Gebiete), waagerechte durchgezogene Linie: unterstellter N-Preis (0,90 EUR/kg N), waagerechte gestrichelte Linie: N-Preis incl. einer Stickstoffsteuer von 1,00 EUR/kg N, rot unterlegter Bereich: 25-75% Quantile (QP-Funktion)**

Neben der starren Regulierung der Düngung durch Bedarfswerte wird aktuell wieder häufiger eine Stickstoffsteuer diskutiert (Grethe et al., 2021), der eine Lenkungsfunktion in Richtung eines sparsameren und umweltschonenderen Einsatzes von N-haltigen Düngemitteln nachgesagt wird. Da jedoch für die hier ausgewerteten Früchte Winterraps und Backweizen die DüV bereits durch Restriktionen der N-Menge zu einer Grenzproduktivität von etwa 2 EUR/kg N führt, würde die Einführung einer Stickstoffsteuer in Höhe von z. B. 1 EUR/kg N keine zusätzliche Lenkungswirkung erwarten lassen, sondern nur die monetären Erlöse der Anbauer verringern.



**Abbildung 8: N-Kosten freie Leistung (NKFL) und N-Grenzproduktivität für Winterweizen unterschiedlicher Qualität. Blaue Linie unten: Median der N-Produktivität, rote Linie unten: geglätteter Mittelwert der N-Produktivität. Blaue senkrechte Linie: ex ante Nopt, grüne senkrechte Linie: erlaubtes Düngeniveau nach DüV, rote senkrechte Linie: erlaubtes Düngeniveau nach DüV -20 % (Rote Gebiete), waagerechte durchgezogene Linie: unterstellter N-Preis (0,90 EUR/kg N), waagerechte gestrichelte Linie: N-Preis incl. einer Stickstoffsteuer von 1,00 EUR/kg N, rot unterlegter Bereich: 25 bzw. 75 % Quantile (QP-Funktion).**

### 3.5 Einflussfaktoren auf die ökonomisch optimale Stickstoffdüngung zu Winterweizen

Eine Analyse der für die einzelnen N-Steigerungsreihen ermittelten ökonomischen Stickstoffdüngungsoptima für Winterweizen geschätzt nach QP-Modell mit den Faktoren Nmin, mittlerer Ertrag, Qualitätsgruppe und Vorfrucht (**Tabelle 5**, Modell 1) zeigte für den Faktor Durchschnittsertrag mit einem Wert von 16 kg N/t Ertrag eine höhere Sensitivität der optimalen Stickstoffdüngung als sie von der Düngerverordnung angenommen wird, welche oberhalb von einem Ertragsniveau von 8 t/ha eine Sensitivität von 10 kg N/t annimmt. Es konnte ebenso keine unterschiedliche Sensitivität des Düngungsoptimums im Hoch- bzw. Niedrigertragsbereich festgestellt werden, wie von der DüV unterstellt. Die Sensitivität des Düngungsoptimums gegenüber dem Ertrag liegt etwas niedriger als der rechnerische zusätzliche N-Bedarf zur Deckung des Korn-N-Entzuges, der bei 12 % Protein 18,1 kg N je t Ertrag beträgt.

Der Effekt des Frühjahrs-Nmin-Werte auf das Düngungsoptimum wurde geringer als in der Düngerverordnung angenommen (Faktor 0,77 vs. 1) geschätzt. Offenbar ist nicht in allen Fällen davon auszugehen, dass der Nmin-Stickstoff in der Bodenschicht 0-90 cm voll verfügbar ist.



Zwischen den Qualitätsgruppen wurden keine signifikanten Unterschiede im Düngungsoptimum festgestellt. Ein vereinfachtes Modell (Modell 2), bei dem für die Qualitätsgruppe E, A, B und C ein Zielproteingehalt von 14,5, 13,0, 12,0 bzw. 11,0 % angenommen wurde und daraus in Kombination mit dem Durchschnittsertrag ein N-Bedarf (N-Entzug bei Durchschnittsertrag) errechnet wurde, beschrieb die Nopt-Daten tendenziell besser (P=0.08).

**Tabelle 5: Effekte auf die optimale N-Düngung zu Winterweizen [kg N/ha]. Basis entspricht Backweizen mit Getreidevorfrucht. Die Parameterwerte für Nmin [kg N/Kg Nmin-N] und Ø Ertrag [kg N/t] geben die Änderung der optimalen Stickstoffdüngungshöhe je Einheit an, die Werte für Blattfrucht, C-Weizen, E-Weizen die Verschiebung der optimalen Stickstoffdüngungshöhe gegen über dem Standard Backweizen.**

| Parameter   | Schätzer              |                       |
|---|-----------------------|-----------------------|
|   | Modell 1              | Modell 2              |
| Abs. Glied  | 114,70 <sup>***</sup> | 138,54 <sup>***</sup> |
| Nmin  | -0,77 <sup>***</sup>  | -0,78 <sup>***</sup>  |
| Blattfrucht   | -16,17 <sup>**</sup>  | -15,73 <sup>**</sup>  |
| C-Weizen  | -16,76                |                       |
| E-Weizen  | -1,66                 |                       |
| Ø Ertrag  | 16,09 <sup>***</sup>  |                       |
| N-Bedarf <sup>#</sup>                                   |                       | 0,70 <sup>***</sup>   |
| Beobachtungen   | 424                   | 424                   |
| Marginal R <sup>2</sup> /<br>Conditional R <sup>2</sup> | 0,221 / 0,465         | 0,197 / 0,435         |

<sup>#</sup> - N-Entzug bei Durchschnittsertrag

ns - nicht signifikant bei  $p=0,05$ , \* -  $p<0,05$ , \*\* -  $p<0,01$ , \*\*\* -  $p<0,001$

Aus diesen Ergebnissen kann gefolgert werden, dass insbesondere für Backweizen und Futterweizen die DüV im Hohertragsbereich deutlich geringere als die ökonomisch optimalen Düngemengen vorgibt. Die geringere Sensitivität des ökonomisch optimierten Düngemodells gegenüber dem Nmin-Stickstoff führt zu steigenden Differenzen der beiden Ansätze bei höheren Frühjahrs-Nmin-Werten. Für den E-Weizen sowie im Niedrigertragsbereich unterhalb 7 t/ha sind die Unterschiede zwischen der ökonomisch optimalen N-Düngung und der DüV gering.

### 3.6 Stickstoffbilanz und Stickstoffauswaschung

Für den im Rahmen der Analyse der Stickstoffdüngung auf Ertrag und Qualitätsparameter bei Winterweizen und Winterraps genutzten Datensatz wurden keine Daten zur Stickstoffauswaschung erhoben. Für die Bewertung der Kosten/Nutzen-Relation der Regelungen der DüV ist eine Abschätzung ihrer Wirksamkeit in Richtung auf eine Minderung der Nitratausträge von besonderem Interesse. Um den Zusammenhang zwischen Stickstoffbilanz und Stickstoffauswaschung exemplarisch zu untersuchen, wurden daher Daten eines langjährigen statischen, d.h. mit über die Jahre mit konstanten N-Stufen durchgeführten Düngungsversuchs re-analysiert, welcher sowohl mineralische als auch organische Stickstoffdüngung zu Winterweizen, Winterraps und Wintergerste kombinierte (Sieling und Kage, 2006). Die hier vorliegende Analyse weicht von Sieling & Kage (2006) dahingehend ab, als für die Auswaschungsberechnung die Messwerte der Nitratkonzentration in 150 cm anstelle der Tiefe 90 cm herangezogen wurden und die Wasserflussraten nicht aus der klimatischen Wasserbilanz abgeleitet, sondern mit einem dynamischen Wasserhaushaltsmodell berechnet wurden. Die zwischen den Jahren unterschiedliche Sickerwasserbildung, die Fruchtart und die N-Bilanz in den organisch gedüngten Parzellen hatten den größten Einfluss auf die Höhe der Stickstoffauswaschung (**Abbildung 9, Tabelle**). Nach Winterraps unter Winterweizen traten die höchsten N-Verluste durch Auswaschung auf, wohingegen nach Wintergerste unter Winterraps die N-Verluste auch bei höheren Bilanzüberschüssen in organisch gedüngten Varianten vergleichsweise gering waren. Der Grund hierfür ist die deutlich höhere N-Aufnahme von Winterraps im Herbst vor Beginn der Auswaschungsperiode. Die dargestellten Ergebnisse belegen für rein mineralisch gedüngte Varianten einen oft nur schwachen Zusammenhang zwischen Stickstoffbilanz und Stickstoffauswaschung. So beträgt die Steigerung der Stickstoffauswaschung je Einheit Stickstoffbilanzüberschuss nach Winterweizen 0,045 kg (**Tabelle 7**) und ist nach Wintergerste unter Winterraps nicht signifikant von Null verschieden. Deutlich höhere N-Auswaschungsverluste werden nach Gülledüngung ermittelt, wobei jedoch im analysierten Versuch ausschließlich Varianten mit Herbst bzw. Herbst + Frühlingsausbringung von Schweinegülle getestet wurden. Kumulative Effekte der langjährig unterschiedlichen Stickstoffdüngung konnten im ausgewerteten Datensatz nicht nachgewiesen werden.

Im Gegensatz zu den gezeigten Auswertungen zu den Effekten der Stickstoffdüngung auf die Ertragsparameter von Winterraps und Winterweizen beruht die Analyse zur Stickstoffauswaschung nur auf den Ergebnissen eines Standorts. Die vergleichende, modellbasierte Berechnung der Stickstoffauswaschung nach Winterraps von Rübiger et al. (2020) zeigt jedoch, dass der Standort Hohenschulen als vergleichsweise stickstoffauswaschungsgefährdet anzusprechen ist. Der Zusammenhang zwischen Stickstoffbilanz und Stickstoffauswaschung ist mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht-linear, wobei quadratische, exponentielle (Børgesen et al., 2022) und linear-Plateau-Modelle (Lord and Mitchell, 1998; Sieling and Kage, 2006) genutzt wurden, um diese Abhängigkeit zu beschreiben. Für den ausgewerteten Datensatz wurde jedoch bei getrennter Betrachtung von mineralischen und organischen Varianten eine Nichtlinearität des Zusammenhangs nicht nachgewiesen, sodass ein

einfaches lineares Modell angepasst wurde. Hieraus folgt ggf. eine Unterschätzung der Anteile ausgewaschenen Stickstoffs im Bereich höherer Bilanzüberschüsse und auf der anderen Seite eine Überschätzung im Bereich niedriger N-Salden. In einer aktuellen Meta-Analyse (Zhao et al., 2022) wurde auf der Grundlage von Versuchsdaten aus verschiedenen europäischen Ländern die marginale Stickstoffauswaschung, d.h. die Änderung der Stickstoffauswaschung je Einheit zusätzlicher gedüngter Stickstoffmenge am jeweiligen ökonomischen Stickstoffdüngungsoptimum ermittelt. Die Autoren errechneten Werte der marginalen Stickstoffauswaschung, die je nach Fruchtfolge zwischen 5,6 und 22% lagen. Bei Bewuchs über Winter mit Wintergetreide lag nach Schätzung der Autoren die mittlere marginale N-Auswaschung bei 14,8%. Zum Vergleich mit den Koeffizienten der vorliegenden Studie errechneten Zusammenhang zwischen Stickstoffauswaschung und Stickstoffbilanz wäre dieser Wert durch die marginale Stickstoffeffizienz zu teilen, wodurch sich etwa 0,3 kg NO<sub>3</sub>-N-Auswaschung je kg Bilanzüberschuss ergeben würden. Andere Autoren berichten dagegen von einer weitgehenden Insensitivität der Stickstoffauswaschung gegenüber der Stickstoffdüngung unterhalb des ökonomischen Optimums (Delin and Stenberg, 2014; Lord and Mitchell, 1998), d.h. eine Senkung der Stickstoffdüngung unterhalb dieses Niveaus blieb in diesen Versuchen weitgehend ohne Effekt auf die N-Auswaschung.

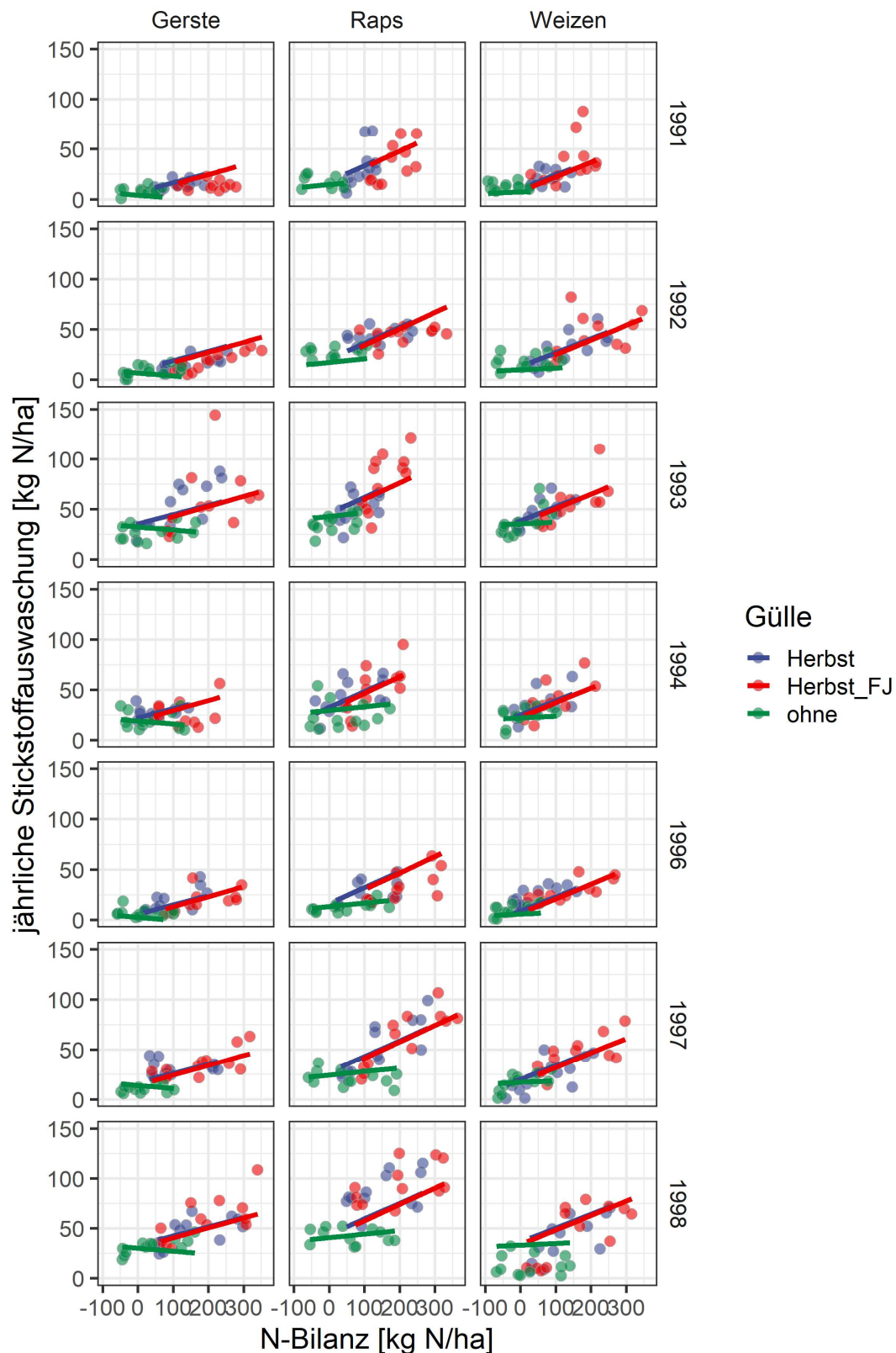
Doch selbst Zhao et al. (2022) kommen zu dem Schluss „The marginal nitrate leaching was estimated at below 20%, which indicates that for fertilization rates of around the recommended rate, only a minor part of the added N fertilizer is lost through leaching; therefore, other means of reducing nitrate leaching than fertilization rate should be explored and prioritized.“

**Tabelle 6: Parameterschätzer eines gemischten Modells zur Analyse der Effekte auf Stickstoffauswaschung. Das absolute Glied entspricht der Stickstoffauswaschung nach Gerste unter Raps mit Gülledüngung im Herbst. Für die Berechnung der Stickstoffauswaschung einer Variante sind die Schätzer entsprechend zu addieren.**

| <i>Effekt</i>  | <b>Stickstoffauswaschung [kg N/ha/a]</b> |                  |
|--|--|------------------|
|  | <i>Schätzer</i>                          | <i>p</i>         |
| Absolutes Glied                                      | 18,55                                    | <b>&lt;0,001</b> |
| Δ [Raps]   | 10,61                                    | <b>&lt;0,001</b> |
| Δ [Weizen]   | 3,18                                     | 0,066            |
| Δ [Herbst FJ]  | -2,56                                    | 0,303            |
| Δ [ohne]   | -3,05                                    | 0,082            |
| Δ NBilanz  | 0,0930                                   | <b>&lt;0,001</b> |
| Δ [Raps] * NBilanz                                   | 0,0644                                   | <b>&lt;0,001</b> |
| Δ [Weizen] * NBilanz                                 | 0,0458                                   | <b>&lt;0,001</b> |
| Δ [Herbst FJ] * NBilanz                              | 0,0067                                   | 0,669            |
| Δ [ohne] * NBilanz                                   | -0,1219                                  | <b>&lt;0,001</b> |
| Beobachtungen  | 748                                      |                  |
| Marginal R <sup>2</sup> / Conditional R <sup>2</sup> | 0,418 / 0,648                            |                  |

**Tabelle 7: Aus einem statistischen Modell abgeleitete Nitratauswaschung bei ausgeglichener N-Bilanz und Sensitivität der Auswaschung gegenüber der N-Bilanz (lineares Modell) nach Anbau verschiedener Früchte und mit unterschiedlichen Gülledüngungsregimen.**

| Nach Anbau von | Gülldüngung     | Auswaschung bei N-Bilanz=0 [kg N/ha] | Änderung N-Auswaschung je kg Bilanzüberschuss [-] |
|----------------|-----------------|--------------------------------------|---|
| Wintergerste   | Herbst          | 18,6                                 | 0,093   |
| Winterraps     | Herbst          | 29,2                                 | 0,157   |
| Winterweizen   | Herbst          | 21,7                                 | 0,139   |
| Wintergerste   | Herbst&Frühjahr | 16,0                                 | 0,100   |
| Winterraps     | Herbst&Frühjahr | 26,6                                 | 0,164   |
| Winterweizen   | Herbst&Frühjahr | 19,2                                 | 0,146   |
| Wintergerste   | ohne            | 15,5                                 | -0,029  |
| Winterraps     | ohne            | 26,1                                 | 0,035   |
| Winterweizen   | ohne            | 18,7                                 | 0,045   |



**Abbildung 9: Jährliche Stickstoffauswaschung als Funktion der N-Bilanz für 7 Versuchsjahre am Standort Hohenschulen, jeweils nach Anbau der Früchte Wintergerste, Winterraps und Winterweizen für ausschließlich mit Mineraldünger bzw. zusätzlich im Herbst bzw. im Herbst und Früh-jahr mit Schweinegülle (jährlich jeweils ca. 80 kg Gesamt-N/ha) gedüngte Bestände. Das Jahr bezeichnet jeweils das Erntejahr und die Stickstoffauswaschung bezieht sich auf den Zeitraum nach der Ernte.**

## 4 Schlussfolgerungen

Die vorliegenden Analysen zeigen, dass für Winterweizen und Winterraps die Bedarfswerte der DüV unter dem ökonomischen Optimum liegen und damit zu einer Verminderung der N-Bilanzreste gegenüber einer rein am ökonomischen Optimum orientierten Düngung führen, wobei die ökonomischen Einbußen bei Winterweizen gering und bei Winterraps moderat sind. Eine weitere pauschale Absenkung der Bedarfswerte um 20 %, wie in den Roten Gebieten vorgeschrieben, reduziert die Stickstoff-Kosten freie Leistung (NKfL) dagegen bei beiden Früchten merklich. Zwar werden dabei die N-Bilanzüberschüsse weiter verringert. Allerdings ist fraglich, ob diese Verringerung auch zu einem weiteren Rückgang der Nitratbelastung im Sickerwasser gegenüber einer Düngung nach den Vorgaben der „Normalwerte“ der DüV führt, da insbesondere nach Raps auch bei unterlassener N-Düngung und damit bei deutlich negativer N-Bilanz die Nitratauswaschung auf einem höheren Niveau liegt als z. B. nach optimal gedüngtem Getreide. Nach den hier gezeigten Daten erscheint es fraglich, ob für die beiden hier geprüften Früchte die Düngerrestriktion von -20 %, die in den sogenannten Roten Gebieten durch die DüV vorgeschrieben ist, sich tatsächlich noch im Rahmen der Verhältnismäßigkeit bewegt. Maßnahmen wie der Anbau von Zwischenfrüchten, Anpassung der Bodenbearbeitung im Herbst oder die Umstellung der Fruchtfolge können die Nitratauswaschung wesentlich effizienter und kostengünstiger mindern als eine pauschale Reduktion der Stickstoffdüngung (Osterburg & Runge 2007).

Eine bundesweit einheitliche und verbindliche Regelung zur Düngungshöhe sollte generell mit großer Sorgfalt, nachvollziehbar und auf wissenschaftlich, statistisch fundierter Grundlage ermittelt werden; selbst geringe Abweichungen von einem bestmöglichen Schätzer der Düngungshöhe können bedeutende ökologische und ökonomische Effekte haben. Aus einem naturwissenschaftlichen Verständnis heraus sollte dies auf einer möglichst umfassenden und die Regeln der Kunst berücksichtigenden sowie transparenten Analyse von Feldversuchsdaten geschehen. Hierbei sollten neben ökonomischen Faktoren auch die durch die Düngung verursachten Emissionen als externe Kosten, aber auch Leakage-Effekte durch Produktionsverlagerung berücksichtigt werden. Die Stickstoffbedarfswerte der Düngeverordnung liegen für die beiden untersuchten Kulturen deutlich unterhalb der ökonomisch optimalen Stickstoffdüngung und genügen daher bereits dem Anspruch der Berücksichtigung externer Kosten daher tendenziell. Wegen der sehr stark nichtlinearen Zusammenhänge zwischen Düngungshöhe und Nitratauswaschung erscheint es fraglich, ob für die beiden hier untersuchten Kulturen die z. Zt. in „Roten Gebieten“ vorgeschriebene weitere Reduktion der Düngungshöhe um 20 % noch zu einer merklichen Entlastung der Grundwasserbelastung führt. Zu dieser Thematik und insbesondere zur dem hier nur am Rande behandelten Themenkomplex der globalen Klimaeffekte der Stickstoffdüngung und der damit verbundenen optimalen



Produktionsintensität und Produktionstechnik besteht jedoch noch umfangreicher Forschungsbedarf. Insgesamt sollte die Ableitung von Düngedaten in Zukunft nach Möglichkeit in noch engerer Kooperation der Länderdienststellen gemeinsam mit der Wissenschaft erfolgen. Im Sinne der Nachvollziehbarkeit und Transparenz sollten die zugrundeliegenden Daten und Auswertemethoden öffentlich verfügbar gemacht werden.

## Zusammenfassung

### Stickstoffdüngung zu Winterraps und Winterweizen

#### Eine Evaluierung der Düngeverordnung und methodischer Aspekte der Auswertung von Düngerversuchen

Die Höhe der Stickstoffdüngung bestimmt maßgeblich Leistungsparameter und Umweltwirkungen im Ackerbau. Durch die Novellierungen der Düngeverordnung in 2017 und 2020 sind bundeseinheitlich verbindliche Regelungen zur Stickstoffdüngung in Kraft getreten. In der vorliegenden Studie wird eine systematische Evaluierung der Effekte der Düngeverordnung auf Leistungsparameter und die Stickstoffbilanz vorgestellt. Grundlage ist eine umfangreiche Datensammlung von bundesweit durchgeführten Stickstoffsteigerungsversuchen zu Winterraps und Winterweizen. Hierbei wurden auch methodische Aspekte der Auswertung, wie z. B. die Wahl der Ertragsfunktionsform sowie die *ex ante* und *ex post* Bestimmung des Düngungsoptimums analysiert. Weiterhin wurde der Zusammenhang zwischen Stickstoffdüngungshöhe und Stickstoffauswaschung analysiert.

Von drei geprüften Funktionsformen erwies sich sowohl bei Winterraps als auch bei Winterweizen die quadratisch-Plateau-Funktion gegenüber der linear-Plateau und der quadratischen Funktion im Hinblick auf die Abbildungsgüte als überlegen.

Sowohl bei Winterraps als auch bei Winterweizen (Ausnahme Eliteweizen) lagen bei dem unterstellten Preisszenario die Düngevorgaben der Düngeverordnung deutlich (ca. 18-20 %) unterhalb des ökonomischen Optimums. Hiervon gingen jedoch bei Winterweizen nur geringe und bei Winterraps nur moderate Effekte auf die ökonomische Leistung bei gleichzeitig deutlicher Minderung der Stickstoffbilanzüberschüsse aus.

Die in den sogenannten roten Gebieten vorgeschriebene, weitere Absenkung des Düngenniveaus um 20 % minderte die Stickstoffkosten freien Leistung (NKFL) gegenüber dem ökonomischen Optimum merklich und führte bei Winterweizen durchweg zu negativen N-Bilanzsalden. Weiterhin war in vielen Fällen die Proteinkonzentration in Backweizen bei Düngung nach DüV – 20 % niedriger als die jetzigen Handelsstandards für Winterweizen.

Eine Analyse der Einflussfaktoren auf die *ex post* ermittelten Stickstoffdüngungsoptima zeigte teilweise recht deutliche Abweichungen zu den Annahmen der Düngeverordnung. Insbesondere im

Hohertragsbereich folgten hieraus deutlich niedrigere Düngungswerte nach DüV als ökonomisch optimal wäre. Bei Winterraps konnte die in der DüV unterstellte Abhängigkeit des Düngungsoptimums vom mittleren Ertrag des Standortes nicht bestätigt werden.

Eine die Analyse zum Zusammenhang zwischen Stickstoffdüngungshöhe und Stickstoffauswaschung legt den Schluss nahe, dass eine Minderung der Stickstoffdüngung unterhalb des Niveaus der DüV für Winterweizen und Winterraps nur einen sehr geringen Beitrag zur Verringerung der Stickstoffauswaschung leistet.

## Summary

### **Nitrogen fertilization to winter rape and winter wheat**

#### **An evaluation of the fertilizer regulation and methodological aspects of fertilizer test evaluation.**

The amount of nitrogen fertilization significantly determines performance parameters in and environmental impacts on arable farming. With the amendments to the Fertilizer Ordinance (Düngeverordnung, DÜV) in 2017 and 2020, nationally binding regulations on nitrogen fertilization have come into force. This study presents a systematic evaluation of the effects of the Fertilizer Ordinance on performance parameters and the nitrogen balance, based on a comprehensive amount of data from nitrogen increase trials on winter oilseed rape and winter wheat, collected throughout Germany. The study included an analysis of methodological aspects of the evaluation, such as the choice of the yield function form and both the *ex ante* and *ex post* determination of a fertilization optimum. The relationship between nitrogen fertilization levels and nitrogen leaching was also analysed.

Of three functional forms tested, the quadratic plateau function proved superior to the linear plateau and quadratic functions in terms of mapping quality for both winter canola and winter wheat.

For both winter oilseed rape and winter wheat (with the exception of elite wheat), fertilizer requirements according to the Fertilizer Ordinance were significantly (approx. 18-20%) below the economic optimum in the assumed price scenario. However, this had only minor effects on the economic performance of winter wheat and only moderate effects on the economic performance of winter oilseed rape, while at the same time significantly reducing the nitrogen balance surpluses.

The further 20% reduction in fertilizer levels mandated in the so-called red areas noticeably reduced nitrogen-cost free output compared to the economic optimum and consistently resulted in negative N balance balances in winter wheat. Furthermore, in many cases the protein concentration in baking wheat when fertilized according to the Fertilizer Ordinance was 20 % lower than the current commercial standards for winter wheat.

An analysis of the factors influencing the nitrogen fertilization optima determined *ex post* showed, in part, quite significant deviations from the assumptions of the Fertilizer Ordinance. Especially in the high-yield area, this resulted in significantly lower fertilization values than those stated in the Fertilizer Ordinance, which would not be economically optimal. In the case of winter oilseed rape, the dependence of the fertilization optimum on the average yield of the site, as the Fertilizer Ordinance assumes, could not be confirmed.

An analysis of the relationship between nitrogen fertilization levels and nitrogen leaching suggests that a reduction in nitrogen fertilization below the level stated by the Fertilizer Ordinance for winter wheat and winter oilseed rape makes only a very small contribution to reducing nitrogen leaching.

## Literatur

1. ADDY, J.W.G., R.H. ELLIS, A.J. MACDONALD, M.A. SEMENOV und A. MEAD (2020): Investigating the effects of inter-annual weather variation (1968–2016) on the functional response of cereal grain yield to applied nitrogen, using data from the Rothamsted Long-Term Experiments. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 284: 107898. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107898>.
2. Bäckman, S.T., S. Vermeulen und V.-M. Taavitsainen (1997): Long-term fertilizer field trials: comparison of three mathematical response models. In: *Agricultural and Food Science in Finland* 6: 151-160. <https://doi.org/10.23986/afsci.72778>.
3. BATES, D., M. MÄCHLER, B.M. BOLKER und S.C. WALKER (2015): Fitting linear mixed-effects models using lme4. In: *Journal of Statistical Software* 67: 1-48. <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>.
4. BÉLANGER, G., J.R. WALSH, J.E. RICHARDS, P.H. MILBURN und N. ZIADI (2000): Comparison of three statistical models describing potato yield response to nitrogen fertilizer. In: *Agronomy Journal* 92: 902-908. <https://doi.org/10.2134/agronj2000.925902x>.
5. BMEL (2017): Düngeverordnung vom 26. Mai 2017 (BGBl. I S. 1305), die durch Artikel 97 des Gesetzes vom 10. August 2021 (BGBl. I S. 3436) geändert worden ist.
6. Børgesen, C.D., Pullens, J.W.M., Zhao, J., Blicher-Mathiesen, G., Sørensen, P., Olesen, J.E., 2022. NLES5 – An empirical model for estimating nitrate leaching from the root zone of agricultural land. *Eur. J. Agron.* 134, 126465. [10.1016/j.eja.2022.126465](https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126465).
7. BULLOCK, D.S. und BULLOCK, G.B. (1994a): Quadratic and quadratic-plus-plateau models for predicting optimal nitrogen rate of corn: a comparison. In: *Agronomy Journal* 86:191-195. <https://doi.org/10.2134/agronj1994.00021962008600010033x>.
8. BULLOCK, D.S. und BULLOCK, G.B. (1994b): Calculation of optimal nitrogen fertilizer rates. In: *Agronomy Journal* 86: 921-923. <https://doi.org/10.2134/agronj1994.00021962008600050030x>.
9. CERRATO, M.E. und A.M. BLACKMER (1990): Comparison of models for describing corn yield response to nitrogen fertilizer. In: *Agronomy Journal* 82: 138-143. <https://doi.org/10.2134/agronj1990.00021962008200010030x>.
10. Delin, S., Stenberg, M., 2014. Effect of nitrogen fertilization on nitrate leaching in relation to grain yield response on loamy sand in Sweden. *Eur. J. Agron.* 52, 291–296. [10.1016/j.eja.2013.08.007](https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.08.007).
11. GRETHE, H., J. MARTINEZ, B. OSTERBURG, F. TAUBE und F. THOM (2021): Klimaschutz im Agrar- und Ernährungssystem Deutschlands: Die drei zentralen Handlungsfelder auf dem Weg zur Klimaneutralität. [https://www.stiftung-klima.de/app/uploads/2021/06/2021-06-01-Klimaneutralitaet\\_Landwirtschaft.pdf](https://www.stiftung-klima.de/app/uploads/2021/06/2021-06-01-Klimaneutralitaet_Landwirtschaft.pdf). Zugriff am 01. Oktober 2021.

12. Henke, J., Bottcher, U., Neukam, D., Sieling, K., Kage, H., 2008. Evaluation of different agronomic strategies to reduce nitrate leaching after winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) using a simulation model. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 82, 299–314. [10.1007/s10705-008-9192-0](https://doi.org/10.1007/s10705-008-9192-0).
13. HENKE, J., K. SIELING, W. SAUERMANN und H. KAGE (2009): Analysing soil and canopy factors affecting optimum nitrogen fertilization rates of oilseed rape (*Brassica napus*). In: *Journal of Agricultural Science* 147: 1-8; <https://doi.org/10.1017/S0021859608008162>.
14. HOTHORN, T., F. BRETZ und P.H. WESTFALL (2008): Simultaneous interference in general parametric models. In: *Biometrical Journal* 50: 346-363. <https://doi.org/10.1002/bimj.200810425>.
15. KNUDSEN, L. (2016): Upward revision of restrictions on nitrogen applications in Denmark. In: *Proceedings of the International Fertiliser Society* 791. ISBN 978-0-85310-428-5.
16. LENTH, R.V. (2021): emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means. <https://CRAN.R-project.org/package=emmeans>. Zugriff am 15. September 2021
17. Lord, E.I., Mitchell, R.D.J., 1998. Effect of nitrogen inputs to cereals on nitrate leaching from sandy soils. *Soil Use Manage.* 14, 78–83. [10.1111/j.1475-2743.1998.tb00619.x](https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.1998.tb00619.x).
18. LYONS, S.E., Z. TANG, J. BOOTH und Q.M. KETTERINGS (2019): Nitrogen response models for winter cereals grown for forage. In: *Journal of Agronomy and Crop Science* 205: 248-261. <https://doi.org/10.1111/jac.12310>.
19. MACDONALD, A.J., D.S. POWLSON, P.R. POULTON und D.S. JENKINSON (1989): Unused fertilizer nitrogen in arable soils - its contribution to nitrate leaching. In: *Journal of the Science of Food and Agriculture* 46: 407-419. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740460404>.
20. MAKOWSKI, D., D. WALLACH und J.-M. MEYNARD (1999): Models of yield, grain protein, and residual mineral nitrogen responses to applied nitrogen for winter wheat. In: *Agronomy Journal* 91: 377-385. <https://doi.org/10.2134/agronj1999.00021962009100030005x>.
21. MAKOWSKI, D., A. MALTAS, M. MORISON und R. REAU (2005): Calculating N fertilizer doses for oil-seed rape using plant and soil data. In: *Agronomy for Sustainable Development* 25: 159-161. <https://doi.org/10.1051/agro:2004052>.
22. MEYER-AURICH, A., A. WEERSINK, M. GANDORFER und P. WAGNER (2010): Optimal site-specific fertilization and harvesting strategies with respect to crop yield and quality response to Nitrogen. In: *Agri. Syst.* 103: 478–485. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2010.05.001>.
23. MEYER-AURICH, A. und Y.N. KARATAY (2019): Effects of uncertainty and farmers' risk aversion on optimal N fertilizer supply in wheat production in Germany. In: *Agricultural Systems* 173: 130-139. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.02.010>.
24. NIGON, T.J., C. YANG, D.J. MULLA und D.E. KAISER (2019): Computing uncertainty in the optimum nitrogen rate using a generalized cost function. In: *Computers and Electronics in Agriculture* 167: 105030. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105030>.
25. NIJLAND, G.O., J. SCHOOLS und J. GOUDRIAAN (2008): Integrating the production functions of Liebig, Michaelis-Menten, Mitscherlich and Liebscher into one system dynamics model. *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences* 55: 199–226. [https://doi.org/10.1016/S1573-5214\(08\)80037-1](https://doi.org/10.1016/S1573-5214(08)80037-1).
26. Osterburg, B., Runge, T. (Eds.), 2007. Maßnahmen zur Reduzierung von Stickstoffeinträgen in Gewässer - eine wasserschutzorientierte Landwirtschaft zur Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie. *FAL, Braunschweig*, 3 pp.
27. Padfield, D., 2021. nlsLoop: Methods for Finding the Best Estimated Fits for Non-Least Squares Regression over the Level of a Factor. <https://github.com/padpadpadpad/nlsLoop>
28. PADFIELD, D., H. O'SULLIVAN und S. PAWAR (2021): rTPC and nls.multstart: A new pipeline to fit thermal performance curves in R. In: *Methods in Ecology and Evolution* 12: 1138-1143. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13585>.

29. Piepho, H.-P. (2004): An algorithm for a letter-based representation of all pairwise comparisons. In: *Journal of Computational and Graphical Statistics* 13: 456–466. <https://doi.org/10.1198/1061860043515>.
30. RÄBIGER, T. (2020): Direct and indirect nitrous oxide emissions in oilseed rape production systems: Measurement and simulation. Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung, Band 104, Dissertation Universität Kiel.
31. RÄBIGER, T., M. ANDRES, H. HEGEWALD, K. KESENHEIMER, K. KÖBKE, T. SUAREZ QUINONES, U. BÖTTCHER und H. KAGE (2020): Indirect nitrous oxide emissions from oilseed rape cropping systems by NH<sub>3</sub> volatilization and nitrate leaching as affected by nitrogen source, N rate and site conditions. In: *European Journal of Agronomy*, 116: 126039. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126039>.
32. RATJEN, A.-M. und H. KAGE (2017): Predicting the site specific soil N supply under winter wheat in Germany. In: *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 110: 71–81. <https://doi.org/10.1007/s10705-017-9850-1>.
33. R CORE TEAM (2019): R: A language and environment for statistical computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
34. REINSDORF, E., G. BAUMGÄRTEL, A.-M. RATJEN und H. KAGE (2016): Online optimieren. In: *DLG-Mitteilungen*, 20–22.
35. Rossmann, A., Buchner, P., Savill, G.P., Hawkesford, M.J., Scherf, K.A., Mühling, K.H., 2019. Foliar N application at anthesis alters grain protein composition and enhances baking quality in winter wheat only under a low N fertiliser regimen. *Eur. J. Agron.* 109, 125909. [10.1016/j.eja.2019.04.004](https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.04.004)
36. SIELING, K. (2019): Improved N transfer by growing catch crops – a challenge. In: *Journal für Kulturpflanzen* 71: 145-160. <https://doi.org/10.5073/JfK.2019.06.01>.
37. SIELING, K. und H. KAGE (2006): N balance as an indicator of N leaching in an oilseed rape - winter wheat - winter barley rotation. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 115, 261-269. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.01.011>.
38. SIELING, K. und H. KAGE (2010): Efficient N management using winter oilseed rape: A review. In: *Agronomy for Sustainable Development* 30: 271-279; <https://doi.org/10.1051/agro/2009036>.
39. SIELING, K., W. SAUERMAN und H. KAGE (2009): Optimierung der Stickstoffdüngung zu Winterraps durch schlagspezifische Berücksichtigung von Bestandesparametern und Ertragspotenzial. In: Abschlussbericht für die Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e.V. [Zugriff am: 19.08.2021]. Verfügbar unter: <https://ufop.de/medien/downloads/agrar-info/forschung>.
40. SMITH, E.G., B.M. UPADHYAY, M.L. FARVET und R.E. KARAMANOS (2010): Fertilizer response for hybrid and open-pollinated canola and economic optimal nutrient levels. In: *Canadian Journal of Plant Science* 90:305-310. <http://doi.org/10.4141/CJPS09027>.
41. SYLVESTER-BRADLEY, R. und D.R. KINDRED (2009): Analysing nitrogen responses of cereals to prioritize routes to the improvement of nitrogen use efficiency. In: *Journal of Experimental Botany* 60:1939-1951. <https://doi.org/10.1093/jxb/erp116>.
42. TENDLER, L. (2020): Nährstoffmanagement in Dänemark. Landwirtschaftskammer Niedersachsen. <https://www.lwk-niedersachsen.de/download.cfm/file/35717.html>. Zugriff am 29. September 2021.
43. XIA, Y. und X. YAN (2011): Comparison of statistical models for predicting cost effective nitrogen rate at rice–wheat cropping systems. In: *Soil Science and Plant Nutrition* 57:320-330, <https://doi.org/10.1080/00380768.2011.578259>.
44. Zhao, J., Pullens, J.W.M., Sørensen, P., Blicher-Mathiesen, G., Olesen, J.E., Børgesen, C.D., 2022. Agronomic and environmental factors influencing the marginal increase in nitrate leaching by adding extra mineral nitrogen fertilizer. *Agric. Ecosyst. Environ.* 327, 107808. [10.1016/j.agee.2021.107808](https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107808).

## Anschrift der Autoren

Prof. Dr. Hennig Kage,  
Dr. Thomas Rübiger,  
Dr. Klaus Sieling  
Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung  
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel  
Hermann-Rodewald-Str. 9  
24118 Kiel

E-Mail: [kage@pflanzenbau.uni-kiel.de](mailto:kage@pflanzenbau.uni-kiel.de)

## Danksagung (optional)

Die Autoren bedanken sich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Landwirtschaftskammern und Länderdienststellen, die Daten von N-Steigerungsversuchen für diese Studie zur Verfügung gestellt haben. Insbesondere bedanken sich die Autoren bei Dr. Eric Reinsdorf und Dr. Gerhard Baumgärtel, die bei der Sammlung und Aufbereitung der Daten der N-Steigerungsversuche für Winterweizen maßgeblich mitgewirkt haben. Prof. Dr. Schmidhalter (TUM München) und Dr. Möller (LTZ Augustenberg) gebührt Dank für die kritische Durchsicht des Manuskripts.

## Referenzen

1. Børgesen, C.D., Pullens, J.W.M., Zhao, J., Blicher-Mathiesen, G., Sørensen, P., Olesen, J.E., 2022. NLES5 – An empirical model for estimating nitrate leaching from the root zone of agricultural land. *Eur. J. Agron.* 134, 126465. 10.1016/j.eja.2022.126465.
2. Delin, S., Stenberg, M., 2014. Effect of nitrogen fertilization on nitrate leaching in relation to grain yield response on loamy sand in Sweden. *Eur. J. Agron.* 52, 291–296. 10.1016/j.eja.2013.08.007.
3. Grethe, H., José Martinez, Bernhard Osterburg, Friedhelm Taube, Ferike Thom, 2021. Klimaschutz im Agrar- und Ernährungssystem Deutschlands: Die drei zentralen Handlungsfelder auf dem Weg zur Klimaneutralität. [https://www.stiftung-klima.de/app/uploads/2021/06/2021-06-01-Klimaneutralitaet\\_Landwirtschaft.pdf](https://www.stiftung-klima.de/app/uploads/2021/06/2021-06-01-Klimaneutralitaet_Landwirtschaft.pdf).
4. Hothorn, T., Bretz, F., Westfall, P., 2008. Simultaneous Inference in General Parametric Models. *Biometrical Journal* 50, 346–363.
5. Lenth, R.V., 2021. emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means. <https://CRAN.R-project.org/package=emmeans>.
6. Lord, E.I., Mitchell, R.D.J., 1998. Effect of nitrogen inputs to cereals on nitrate leaching from sandy soils. *Soil Use Manage.* 14, 78–83. 10.1111/j.1475-2743.1998.tb00619.x.

7. Nijland, G.O., Schouls, J., Goudriaan, J., 2008. Integrating the production functions of Liebig, Michaelis-Menten, Mitscherlich and Liebscher into one system dynamics model. *NJAS-WAGENINGEN JOURNAL OF LIFE SCIENCES* 55, 199–226. 10.1016/S1573-5214(08)80037-1.
8. Padfield, D., 2021. nlsLoop: Methods for Finding the Best Estimated Fits for Non-Least Squares Regression over the Level of a Factor.
9. Piepho, H.-P., 2004. An Algorithm for a Letter-Based Representation of All-Pairwise Comparisons. , *Journal of Computational and Graphical Statistics* 13, 456–466.
10. R Core Team, 2019. R: A Language and Environment for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
11. Rossmann, A., Buchner, P., Savill, G.P., Hawkesford, M.J., Scherf, K.A., Mühling, K.H., 2019. Foliar N application at anthesis alters grain protein composition and enhances baking quality in winter wheat only under a low N fertiliser regimen. *Eur. J. Agron.* 109, 125909. 10.1016/j.eja.2019.04.004.
12. Sieling, K., Kage, H., 2006. N balance as an indicator of N leaching in an oilseed rape - winter wheat - winter barley rotation. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 115, 261–269.
13. Tandler, L., 2020. Nährstoffmanagement in Dänemark. Landwirtschaftskammer Niedersachsen. <https://www.lwk-niedersachsen.de/download.cfm/file/35717.html>.
14. Zhao, J., Pullens, J.W.M., Sørensen, P., Blicher-Mathiesen, G., Olesen, J.E., Børgesen, C.D., 2022. Agronomic and environmental factors influencing the marginal increase in nitrate leaching by adding extra mineral nitrogen fertilizer. *Agric. Ecosyst. Environ.* 327, 107808. 10.1016/j.agee.2021.107808.