

Klaus Sieling, Ulf Böttcher, Henning Kage

Ertragsentwicklung von Winterweizen bei variiertem N-Düngung*

Yield trend of winter wheat with varying N fertilization

169

Zusammenfassung

Dauerversuche können helfen, langfristige Entwicklungen zu identifizieren und zu quantifizieren. In einem Stickstoff-(N)-Steigerungsversuch, der seit 1974 auf dem Versuchsgut Hohenschulen im Östlichen Hügelland Schleswig-Holsteins durchgeführt wird, wurde Winterweizen zu den 3 Terminen Vegetationsbeginn, Schossbeginn EC 30 und Ährenschieben EC 50/51 mit jeweils 0, 40, 80 und 120 kg N ha⁻¹ in allen Kombinationen gedüngt (4*4*4 = 64 N-Varianten, 0–360 kg N ha⁻¹), um ex post das jahresspezifische N-Optimum abschätzen zu können. Die Sorte Diplomat wurde als Standardsorte durchgehend von Versuchsbeginn bis 2002 angebaut, während als zweite, jeweils neuere Sorte Kanzler (1983–1991), Orestis (1992–1995), Ritmo (1996–2004) und Tommi (ab 2005) geprüft wurden. Aus den jahres- und sortenspezifischen Ertragsfunktionen (basierend auf einem quadratischen Ansatz mit der N-Gesamtmenge) wurden der Ertrag in der ungedüngten Variante, die optimale N-Düngung und der entsprechende optimale Ertrag abgeleitet. Daraufhin wurde durch lineare Regression geprüft, ob Ertrags-trends vorlagen. Der Ertrag in der ungedüngten Kontrolle veränderte sich im Zeitablauf nicht signifikant. Demgegenüber stieg der Ertrag bei optimaler N-Düngung bei allen Sorten um 0,63 dt ha⁻¹ a⁻¹, allerdings auf unterschiedlichem absoluten Niveau, signifikant während der Versuchsdauer an, wobei sich jedoch die Höhe der optimalen N-Düngung nicht veränderte. Mit steigenden Erträgen sank die Rohproteinkonzentration. Ein statistisch absicherbarer Zusammenhang zwischen der jahresspezifisch optimalen N-Düngermenge und dem entsprechenden Ertragsniveau konnte nicht beobachtet werden.

Als mögliche Ursachen für die steigenden Erträge bei optimaler N-Düngung werden Veränderungen der Produktionstechnik, der Jahrestemperatur oder der CO₂-Konzentration der Atmosphäre diskutiert.

Stichwörter: Weizen, Ertragstrend, Stickstoffdüngung, Ertragsoptimum

Abstract

Long-term field experiments allow identifying and quantifying trends. A field trial was set up in 1974 at the Hohenschulen Experimental Farm in Schleswig-Holstein (Northern Germany) to test different nitrogen (N) treatments in wheat. N fertilization varied in timing and total amount. 0, 40, 80 or 120 kg N ha⁻¹ were applied each at the beginning of spring growth, at stem elongation (GS 30) and at ear emergence (GS 50/51) in any possible combination resulting in 64 (4*4*4) N treatments ranging from 0 to 320 kg N ha⁻¹. The cultivar Diplomat was grown from the trial set up until 2002, whereas Kanzler (1983–1991), Orestis (1992–1995), Ritmo (1996–2004) and Tommi (since 2005) were parallelly tested as newer genotypes. Yield in the unfertilized control, optimal N amount and the respective grain yield were estimated from the year and genotype specific N response curves (quadratic polynomial function based on the total N amount). Linear regression was used to test for trends in these coefficients. Grain yield without N fertilization showed no trend. However, yield of the optimal fertilized

* Herrn Prof. Dr. Herbert HANUS zum 75. Geburtstag gewidmet.

Institut

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

Kontaktanschrift

PD Dr. Klaus Sieling, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung, Hermann-Rode-wald-Str. 9, 24118 Kiel, E-Mail: sieling@pflanzenbau.uni-kiel.de

Zur Veröffentlichung angenommen

31. März 2011

treatment increased by $0.063 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Yield trend was similar in all varieties, but at different levels indicating genetic improvements. In contrast, the optimal N amount was not affected. Grain protein concentration correlated negatively with the yield level, whereas only a poor relationship between optimal N amount and the respective yield occurred. As causes for the trend in the optimal yield changes in crop management, average mean temperature or CO_2 concentration in the atmosphere are discussed.

Key words: Wheat, yield trends, nitrogen fertilization, yield optimum

Einleitung

Viele Veröffentlichungen zum Thema Ertragstrends betrachteten die Entwicklung der Erträge auf einer Länder- oder Regionsebene (z.B. BELL et al., 1995; CALDERINI und SLAFER, 1998; PELTONEN-SAINIO et al., 2009). Bei solchen Ansätzen werden häufig die beobachteten Ertragssteigerungen in eine genetische und eine agronomische Komponente aufgeteilt. Der genetische Fortschritt beruhte in der Vergangenheit hauptsächlich auf einer Verbesserung des Harvest-Index und, insbesondere seit den 1990er Jahren, auch auf einer Erhöhung der oberirdischen Biomasse, die positiv mit der Strahlungsnutzungseffizienz vor der Blüte und dem Gehalt an wasserlöslichen Kohlenhydraten im Stängel zur Blüte korrelierte (FOULKES et al., 2007). Auf der anderen Seite verringerten Fortschritte in der Produktionstechnik (Pflanzenschutz, (N-)Düngung etc.) das Auftreten von Stresssituationen und erhöhten im Gegenzug die Ausnutzung des genetischen Ertragspotentials.

In den beiden zurückliegenden Jahrzehnten konnte eine Stagnation der Getreideerträge in Europa beobachtet werden. In einer Analyse für Frankreich führten BRISSON et al. (2010) dieses Phänomen auf höhere Temperaturen auf Grund des Klimawandels zurück, die den Ertrag in Folge von Trockenstress während der Schossphase und Hitzestress während der Kornfüllungsphase negativ beeinflussten. Als weitere Ursachen konnten auch Reaktionen der Produktionstechnik auf veränderte politische und/oder ökonomische Rahmenbedingungen durch eine Vereinfachung der Fruchtfolgen (Verzicht auf Leguminosen) oder eine Reduktion der N-Düngung identifiziert werden, während der Züchtungsfortschritt sich kaum verlangsamte. Demgegenüber beobachteten andere Autoren Ertragssteigerungen als Reaktion auf den dem Klimawandel zugrunde liegenden Anstieg der CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre (z.B. WEIGEL et al., 1994; KEELING et al., 2005; MANDERSCHIED et al., 2009).

Die Höhe der optimalen N-Düngung variiert sowohl in Höhe als auch Verteilung von Jahr zu Jahr teilweise erheblich. Nach der Düngeverordnung als Umsetzung der EU-Nitratrichtlinie in deutsches Recht muss der Düngebedarf der Kulturen unter Berücksichtigung der unter den jeweiligen Standort- und Anbaubedingungen zu

erwartenden Erträgen und Qualitäten ermittelt werden. Dabei wird eine positive Korrelation zwischen Ertrag und N-Bedarf unterstellt. Diese Beziehung wird durch Analysen von SYLVESTER-BRADLEY und KINDRED (2009) bestätigt, die auf der Ebene britischer Betriebe einen positiven Zusammenhang zwischen der Höhe der Weizenerträge und den entsprechenden N-Aufwendungen beobachteten.

In vielen Dauerversuchen zur Düngung (z.B. Rothamsted Classical Experiments, Dauerdüngungsversuch Bad Lauchstädt) liegen die jeweiligen Intensitäten immer auf den gleichen Parzellen, so dass sich die Behandlungseffekte im Zeitverlauf akkumulieren (JOHNSTON, 1994; KÖRSCHENS, 2001; SIELING, 2001; HEJCMAN und KUNZOVÁ, 2010). Auf ungedüngten oder suboptimal versorgten Parzellen kommt es zu einer Aushagerung, während auf den hoch versorgten Varianten sich Nährstoffe anreichern und damit langfristig die Bodenfruchtbarkeit und die Nährstoffdynamik verbessern. Allerdings ist dabei eine Trennung der Effekte der aktuellen Düngung und der Residualeffekte aus der vorausgegangenen Düngung nicht möglich.

An Hand eines langjährigen Stickstoffsteigerungsversuches sollen die Hypothesen überprüft werden, dass sich die ökonomisch optimalen Erträge von Winterweizen und die zur Erreichung des Optimalertrages notwendigen N-Düngermengen seit 1975 nicht veränderten. Darüber hinaus soll der Züchtungsfortschritt durch den Vergleich einer alten mit moderneren Sorten analysiert werden. Dabei wurden durch ein entsprechendes Versuchsdesign (einheitliches Düngeniveau für eine Rotation, suboptimale Düngung der Vorfrucht) einheitliche Ausgangsbedingungen zur Prüfung der unterschiedlichen N-Düngungsvarianten geschaffen.

Material und Methoden

Der Versuch liegt auf dem Versuchsgut Hohenschulen der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel ca. 15 km westlich von Kiel im Endmoränengebiet des Naturraums Östliches Hügelland in Schleswig-Holstein auf einem sandigen Lehm (Parabraunerde, ca. 50 Bodenpunkte). Die durchschnittlichen Jahresniederschläge betragen ca. 750 mm, von denen ca. 350 mm in der Regel in der Zeit von März bis September fallen. Die langjährige Jahresdurchschnittstemperatur liegt bei $8,3^\circ\text{C}$.

Die Anlage des Versuches als Split-Plot-Design erfolgte im Frühjahr 1974 mit dem Ziel, mit Hilfe einer systematisch in Höhe und Verteilung variierten N-Düngung *ex post* jahresspezifische Ertragsfunktionen zu erstellen und daraus das jeweilige Düngeoptimum für Winterweizen und Wintergerste schätzen zu können. In der Fruchtfolge Winterraps – Winterweizen – Hafer – Wintergerste wurden Weizen und Gerste versuchsmäßig gedüngt, während Raps und Hafer mit 90 bzw. 60 kg N ha^{-1} suboptimal mit Stickstoff versorgt wurden, um mögliche N-Überhänge der Vorfrucht zu egalisieren und damit wieder einheitliche Ausgangsbedingungen für die Nachfrucht zu schaffen. Jede Frucht wurde in jedem Jahr in zwei Blöcken

randomisiert auf der Fläche angebaut. Weizen und Gerste wurden zu drei Terminen (Vegetationsbeginn im Frühjahr, Schossbeginn zu EC 30, Ährenschieben zu EC 50/51) gedüngt. Jede Teilgabe umfasste 3 Abstufungen (0, 40 und 80 kg N ha⁻¹), so dass insgesamt 27 (3 × 3 × 3) Verteilungsmuster mit N-Mengen von 0–240 kg N ha⁻¹ vorlagen. Im Zeitverlauf wurden die Teilgaben zusätzlich auf 120 kg N ha⁻¹ gesteigert (1. Teilgabe ab 1980, 2. Teilgabe ab 1978, 3. Teilgabe ab 2003), was die Anzahl der Varianten auf 64 (4 × 4 × 4) bei 0–360 kg N ha⁻¹ erhöhte. Aus versuchstechnischen Gründen waren die N-Varianten innerhalb der Blöcke nicht vollständig randomisiert. Die Düngung zu Weizen und Gerste erfolgte invers, das bedeutet, dass die im Weizen hoch gedüngten Parzellen nach 2 Jahren in der Gerste nur auf einem entsprechend niedrigem Niveau versorgt wurden, um alle Parzellen innerhalb einer Rotation mit der gleichen N-Menge zu düngen. Damit wurde gewährleistet, dass es nicht zu einer systematischen Akkumulation der Düngungseffekte im Zeitverlauf kommt.

Die Sorte Diplomat (Qualitätsgruppe E, früher: A7) wurde als Standardsorte durchgehend von Versuchsbeginn bis 2002 angebaut, während als zweite, jeweils neuere Sorte Kanzler (Qualitätsgruppe A, früher: A6) (1983–1991), Orestis (Qualitätsgruppe B) (1992–1995), Ritmo (Qualitätsgruppe B) (1996–2004) und Tommi (Qualitätsgruppe A) (ab 2005) geprüft wurden. Im Herbst 2002 wurden die Parzellen von 18 m² (1,5 m × 12 m) auf 36 m² (3 m × 12 m) vergrößert, um eine Kernbeerntung auf einer Länge von 6 m zur Minimierung von Randeffekten zu ermöglichen. Auf Grund der zur Verfügung stehenden Fläche konnte daher seit der Ernte 2003 nur noch eine Sorte (2003–2004: Ritmo; ab 2005: Tommi), geprüft werden. Die Erträge wurden auf dt ha⁻¹ bei 86% Trockenmasse korrigiert. Die Bestimmung der Kornproteinkonzentrationen erfolgte mittels NIRS (Nah-Infrarot-Reflektions-Spektroskopie), für die Proben von 1975–1987 nachträglich an Hand von Rückstellproben. Der N-Entzug mit dem Korn errechnet sich aus dem Produkt aus Ertrag und N-Konzentration (= Proteinkonzentration/5.7).

Die übrige Produktionstechnik wie Bodenbearbeitung, Aussaat, Grunddüngung und Pflanzenschutz wurde ortsüblich einheitlich für die jeweilige Frucht durchgeführt. Das Stroh verblieb auf der Fläche.

Der Ertrag der ungedüngten Variante (Y_{null}), das jahresspezifische ökonomische Ertragsoptimum (Y_{opt}) sowie die dafür notwendige N-Menge (N_{opt}) leiteten sich ab aus der quadratischen Ertragsfunktion in Abhängigkeit von der N-Gesamtmenge, die mit Hilfe der Prozedur 'reg' des Statistikprogramms SAS 9.1 separat für jedes Jahr geschätzt wurden (Tab. 1). Dieses Vorgehen erlaubt im Vergleich zur Einbeziehung der Teilgaben eine direkte Berechnung des ökonomischen Ertragsoptimums (Annahme: 19 Euro je dt Weizen, 0,75 Euro je kg N). Bei der Ertragsoptimierung blieb die Proteinkonzentration unberücksichtigt. Die Ergebnisse des Jahres 1982 wurden bei der Auswertung auf Grund fehlender Kornproteinkonzentrationen eliminiert. Die Ermittlung der zeitlichen Trends und die Quantifizierung des Sorteneinflusses erfolgte mit-

tels Kovarianzanalyse (Prozedur 'glm') unter Einbeziehung der Laufzeit als metrisch skalierte Variable, der Sorte als nicht-metrisch skalierte Variable sowie der Interaktion Laufzeit × Sorte (sofern signifikant). Der mittlere Schätzfehler ist als RMSE in den jeweiligen Abbildungen aufgeführt. Bei der Berechnung der Ökovalenz nach WRICKE (1962) wird die durch die Interaktion Jahr × N-Düngung bedingte Varianz den jeweiligen N-Stufen entsprechend aufgeteilt. Dabei bedeutet eine geringe Ökovalenz eine hohe Ertragsstabilität.

Ergebnisse

Die Kovarianzanalyse der aus den Ertragsfunktionen abgeleiteten Erträge der ungedüngten Varianten ergab einen vergleichsweise geringen Anstieg von 0,31 dt ha⁻¹ a⁻¹, der aber auf Grund der großen Jahresvarianz nicht signifikant war (P > 0,05) (Abb. 1a). Auch Unterschiede zwischen den Sorten sowie einer Interaktion Sorte × Jahr ließen sich statistisch nicht absichern.

Im Gegensatz zu den Erträgen der nicht mit Stickstoff gedüngten Varianten stiegen die aus den Ertragsfunktionen abgeleiteten Ertragsoptima im Zeitverlauf signifikant um 0,63 dt ha⁻¹ a⁻¹ an (Abb. 1b). Dabei lagen die Sorten Diplomat und Kanzler auf einem signifikant niedrigeren Niveau als die Sorte Tommi, wobei die fehlende Interaktion Jahr × Sorte eine ähnliche Reaktion der Sorten über die Zeit belegt. Auch bei separater Betrachtung des Ertragstrends für die Sorte Diplomat über den Zeitraum von 1976 bis 2002 war dieser Zusammenhang zu beobachten (nicht dargestellt). Bei gleicher Reaktion erbrachte die Sorte Tommi deutlich höhere Erträge als die Sorte Diplomat. Dieser Ertragsanstieg im Laufe der Jahre kann aber nicht auf eine Erhöhung der eingesetzten N-Menge zurückgeführt werden, da sich die zur Erreichung des optimalen Ertrages notwendige N-Düngung im Zeitverlauf nicht signifikant veränderte und sogar eine leichte rückläufige Tendenz aufwies (Abb. 1c). Die Proteinkonzentration im Korn bei ökonomisch optimaler Düngung nahm in allen Sorten um 0,07% pro Jahr ab (Abb. 1d). Dabei akkumulierten Diplomat und Tommi mehr Protein im Korn als Kanzler, Orestis und Ritmo. Auch bei diesem Merkmal konnte keine Jahr × Sorten-Interaktion beobachtet werden, so dass die Steigung der Geraden bei allen geprüften Sorten identisch war. Demgegenüber unterschieden sich die Sorten bezüglich des Verlaufs der N-Entzüge mit dem Korn bei den zum Ertragsoptimum erforderlichen N-Mengen (Abb. 1e). Während Diplomat einen leicht ansteigenden Trend im N-Entzug zeigte, waren bei Ritmo und insbesondere bei Orestis und Tommi stark ansteigende Entzugswerte zu beobachten, was aber sowohl bei Orestis als auch bei Tommi auf die hohen Entzüge der beiden jeweils letzten Jahren zurückzuführen ist. Im Gegensatz dazu wies Ritmo im gesamten Beobachtungszeitraum (Ausnahme: 1998) eine steigende Tendenz auf.

In Abb. 2a ist die Beziehung zwischen dem Ertrag bei optimaler N-Düngung und der Proteinkonzentration im

**Tab. 1. Parameter der Ertragsfunktionen ($Y = a + b \cdot \text{nges} + c \cdot \text{nges} \cdot \text{nges}$) (moderne Sorten: 1983–1991: Kanzler; 1992–1995: Orestis; 1996–2004: Ritmo; ab 2004: Tommi)
Parameter of the N response curves ($Y = a + b \cdot \text{nges} + c \cdot \text{nges} \cdot \text{nges}$) (modern cultivars: 1983–1991: Kanzler; 1992–1995: Orestis; 1996–2004: Ritmo; ab 2004: Tommi)**

Jahr	Diplomat				moderne Sorten			
	a	b	c	r ²	a	b	c	r ²
1976	30,27	0,30708	-0,00093039	0,32***				
1977	27,62	0,44604	-0,00094910	0,65***				
1978	34,62	0,35030	-0,00068862	0,66***				
1979	36,40	0,30056	-0,00077644	0,48***				
1980	36,42	0,07004	-0,00003019	0,20***				
1981	39,76	0,19578	-0,00038166	0,38***				
1983	57,00	0,22518	-0,00049802	0,45***	58,51	0,14606	-0,00025357	0,19***
1984	24,76	0,27329	-0,00044774	0,54***	31,61	0,30763	-0,00044892	0,58***
1985	45,13	0,15856	-0,00025516	0,40***	48,81	0,20446	-0,00037527	0,32***
1986	40,30	0,20954	-0,00038604	0,34***	40,69	0,21647	-0,00041490	0,29***
1987	52,69	0,20363	-0,00045486	0,47***	50,86	0,21549	-0,00039358	0,54***
1988	32,17	0,38717	-0,00083402	0,72***	31,84	0,42434	-0,00081969	0,81***
1989	54,97	0,21971	-0,00056574	0,38***	47,83	0,18023	-0,00032988	0,43***
1990	39,96	0,28319	-0,00062626	0,58***	47,27	0,25145	-0,00045887	0,63***
1991	51,07	0,27255	-0,00056201	0,73***	53,50	0,25050	-0,00045511	0,66***
1992	42,82	0,26007	-0,00057984	0,27***	37,72	0,27152	-0,00047178	0,29***
1993	33,39	0,26073	-0,00047936	0,78***	28,64	0,37037	-0,00070864	0,69***
1994	18,17	0,25204	-0,00037451	0,61***	25,49	0,31823	-0,00032663	0,77***
1995	42,43	0,36747	-0,00071949	0,67***	43,95	0,44336	-0,00079151	0,83***
1996	44,44	0,23501	-0,00047038	0,45***	54,32	0,33631	-0,00070675	0,45***
1997	43,85	0,33559	-0,00075619	0,59***	52,56	0,32628	-0,00063647	0,51***
1998	43,07	0,25063	-0,00052225	0,42***	54,53	0,25221	-0,00046241	0,49***
1999	38,45	0,35842	-0,00071506	0,65***	53,25	0,38338	-0,00062294	0,63***
2000	42,93	0,37088	-0,00073997	0,62***	57,03	0,38838	-0,00062797	0,75***
2001	54,35	0,31097	-0,00079565	0,30***	55,23	0,44067	-0,00094747	0,49***
2002	43,02	0,26886	-0,00048628	0,39***	37,65	0,32781	-0,00052390	0,49***
2003					51,92	0,47205	-0,00105000	0,69***
2004					39,77	0,43397	-0,00074809	0,64***
2005					56,57	0,36281	-0,00063426	0,71***
2006					55,75	0,33481	-0,00056873	0,66***
2007					39,24	0,34797	-0,00062202	0,65***
2008					46,38	0,41170	-0,00056798	0,69***
2009					45,63	0,43273	-0,00062755	0,70***

Korn dargestellt. Bei allen Sorten zeigte sich eine negative Korrelation zwischen beiden Variablen, wobei genotypische Unterschiede sichtbar wurden. Während Kanzler und Ritmo auf gleichem Niveau lagen, wies die Sorte Orestis die geringsten Werte auf. Dagegen lagen die Sorte Diplomat und insbesondere die Sorte Tommi über den übrigen Sorten. Die Proteinkonzentration sank im Mittel um 0,053% je dt Ertrag. Keinen signifikanten Zusammenhang ergab die statistische Analyse mit allen Sorten zwischen dem Ertrag bei optimaler N-Düngung und der Höhe der optimalen N-Düngung (Abb. 2b). Zwar konnte eine positive Korrelation zwischen beiden Merkmalen bei

der Sorte Tommi oder in abgeschwächter Form auch bei der Sorte Ritmo beobachtet werden, doch war bei Diplomat die Beziehung schwach negativ (nicht signifikant).

Die Verteilung der einzelnen Teilgaben zur Erreichung des Ertragsmaximums variierten im Zeitablauf teilweise erheblich (Abb. 3a + b). Eine grundlegende Tendenz, dass sich die Höhe einzelner Teilgaben im Zeitverlauf veränderte, war nicht zu erkennen.

Im Mittel aller Sorten und Jahre schwankten die Erträge in Abhängigkeit von der Höhe und der Verteilung der N-Düngung zwischen 42,3 und 86,5 dt ha⁻¹ (Tab. 2). Die Ertragswirksamkeit der Teilgaben zu Vegetationsbeginn

(N1) und zum Schossen (N2) war größer als die zum Ährenschieben (N3). Die höchsten Erträge wurden mit Teilgaben von 80 bzw. 120 kg N ha⁻¹ sowohl zu N1 als auch zu N2 erzielt. Die Ertragsstabilität der Düngungssysteme, beurteilt an Hand der Ökovalenz nach WRICKE

(1962), schwankte dabei erheblich (Tab. 2). Die größte Ökovalenz und damit die geringste Ertragsstabilität traten auf, wenn zu den beiden ersten Terminen Vegetationsbeginn und Schossbeginn EC 30 keine Düngung erfolgte. Die vergleichsweise geringe Schwankung bei der 3. N-Gabe

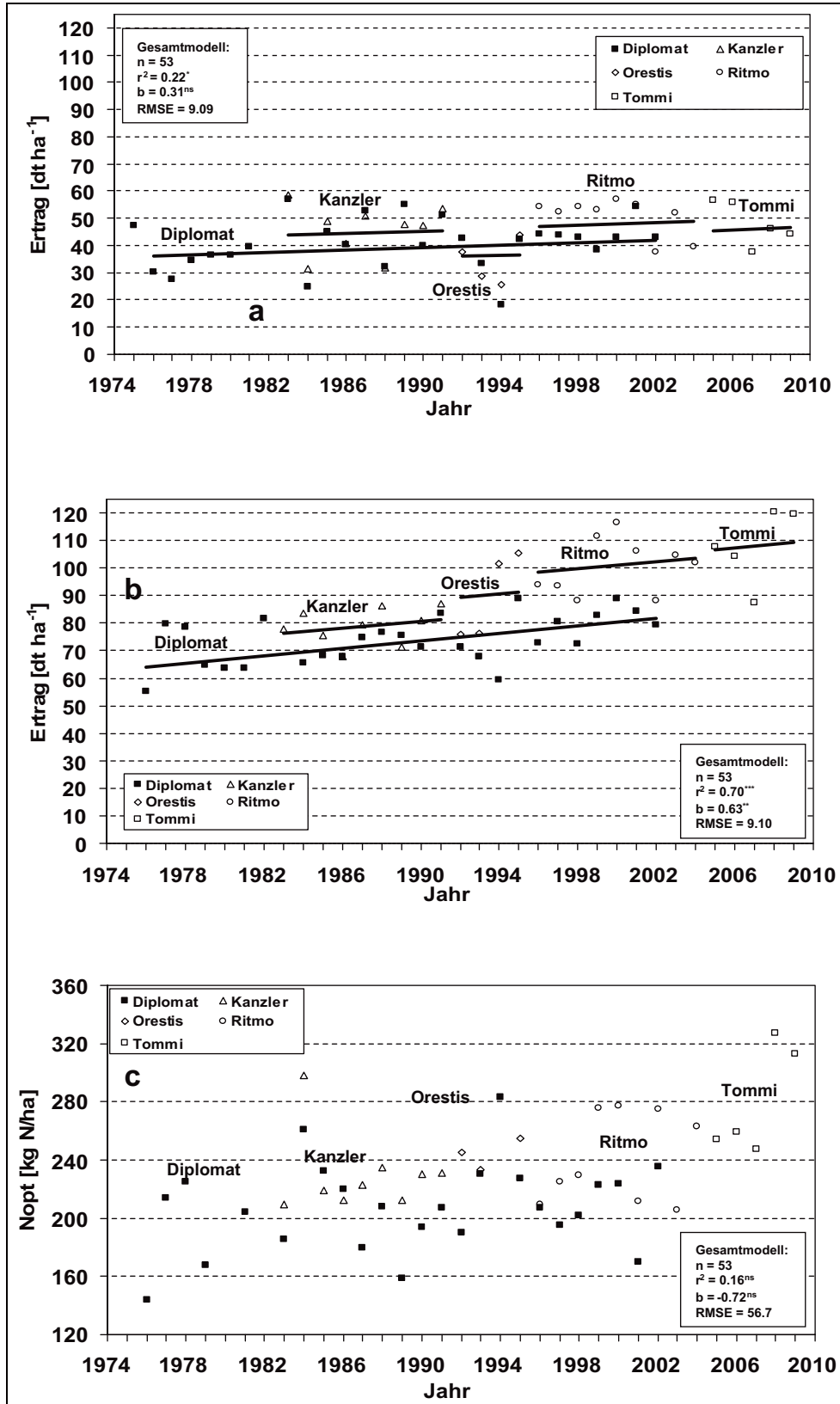
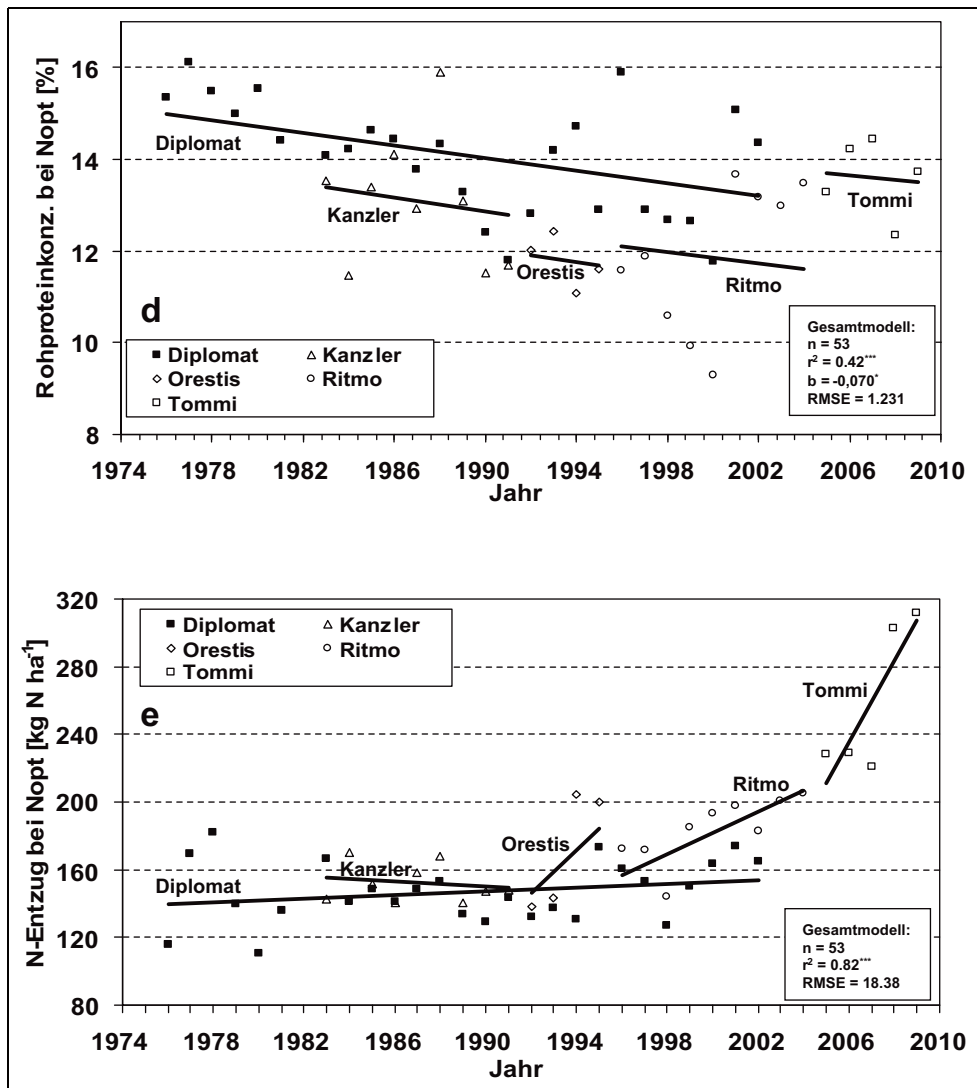


Abb. 1. Zeitliche Trends im Ertrag der ungedüngten Variante (a), im Optimalertrag (b), in der optimalen N-Menge (c), der Rohproteinkonzentration im Korn (d) und des N-Entzugs bei optimaler N-Düngung (e) (RMSE: Root Mean Square Error)
 Trends of the grain yield in the unfertilized control (a), the grain yield at optimal N fertilization (b), the amount of optimal N fertilization (c), the grain crude protein concentration (d) and the N off-take by the grain at optimal N fertilization (e) (RMSE: Root Mean Square Error).

Abb. 1. Fortsetzung
Continue

kann auf die wenig ausgeprägte Ertragswirkung dieser Teilgabe zurückgeführt werden. Der Vergleich der Kombinationen aller drei Teilgaben zeichnet ein sehr heterogenes Bild, aus dem sich nur schwer grundlegende Tendenzen ableiten lassen. Wie schon bei den Einzelgaben wiesen die Kombinationen mit ungedüngter 1. bzw. 2. Teilgabe die geringste Ertragsstabilität auf. Die höchste Ertragsstabilität (entspricht der geringsten Ökovalenz) wurde bei Erträgen von über 70 dt ha⁻¹ erzielt. (Abb. 4).

Diskussion

Die hier präsentierten Daten belegen die Ertragsentwicklung von Weizen aus einem N-Steigerungsversuch seit 1976, wobei über einen Zeitraum von 27 Jahren (1976–2002) Erträge einer Sorte (Diplomat) vorliegen. Obwohl die Anbaubedeutung von Diplomat schon in den 80er Jahren stark zurückgegangen war (69 ha Vermehrungsfläche in 1986 (BUNDESSORTENAMT, 1987)) wurde diese Sorte weiterhin im Versuch geprüft, um eine möglichst lange Zeitreihe ohne Sortenwechsel zu generieren. Ob

insbesondere in den letzten Jahren die Sorteneigenschaften noch mit denen aus den Anfangsjahren völlig identisch waren, ist fraglich, zumal der Züchter die Erhaltungszüchtung in den 90er Jahren einstellte. Allerdings lassen sich weder aus den Verläufen der Erträge der ungedüngten noch aus denen der optimal gedüngten Varianten Hinweise auf eine verringerte Sortenleistung ableiten.

Im Vergleich zu anderen Dauerversuchen (JOHNSTON, 1994; KÖRSCHENS, 2001) sollte eine Akkumulation von Düngeeffekten vermieden werden. Daher wurde innerhalb der Rotation jede Parzelle mit der gleichen N-Menge gedüngt. Bei einer erheblichen Jahresvarianz konnte kein negativer Ertragstrend in den ungedüngten Varianten beobachtet werden. Nach Ergebnissen von SIELING (2001) am gleichen Standort hätten sich diese Effekte trotz der langsamen Reaktion des Systems Boden auf ein verändertes Anbaumanagement im Zeitverlauf von mehr als zwei Jahrzehnten manifestieren müssen. Auch HÜLSBERGEN et al. (2002) konnten bei ihren Untersuchungen keinen Ertragstrend in den ungedüngten Varianten beobachten, während im Gegensatz dazu in den Versuchen von

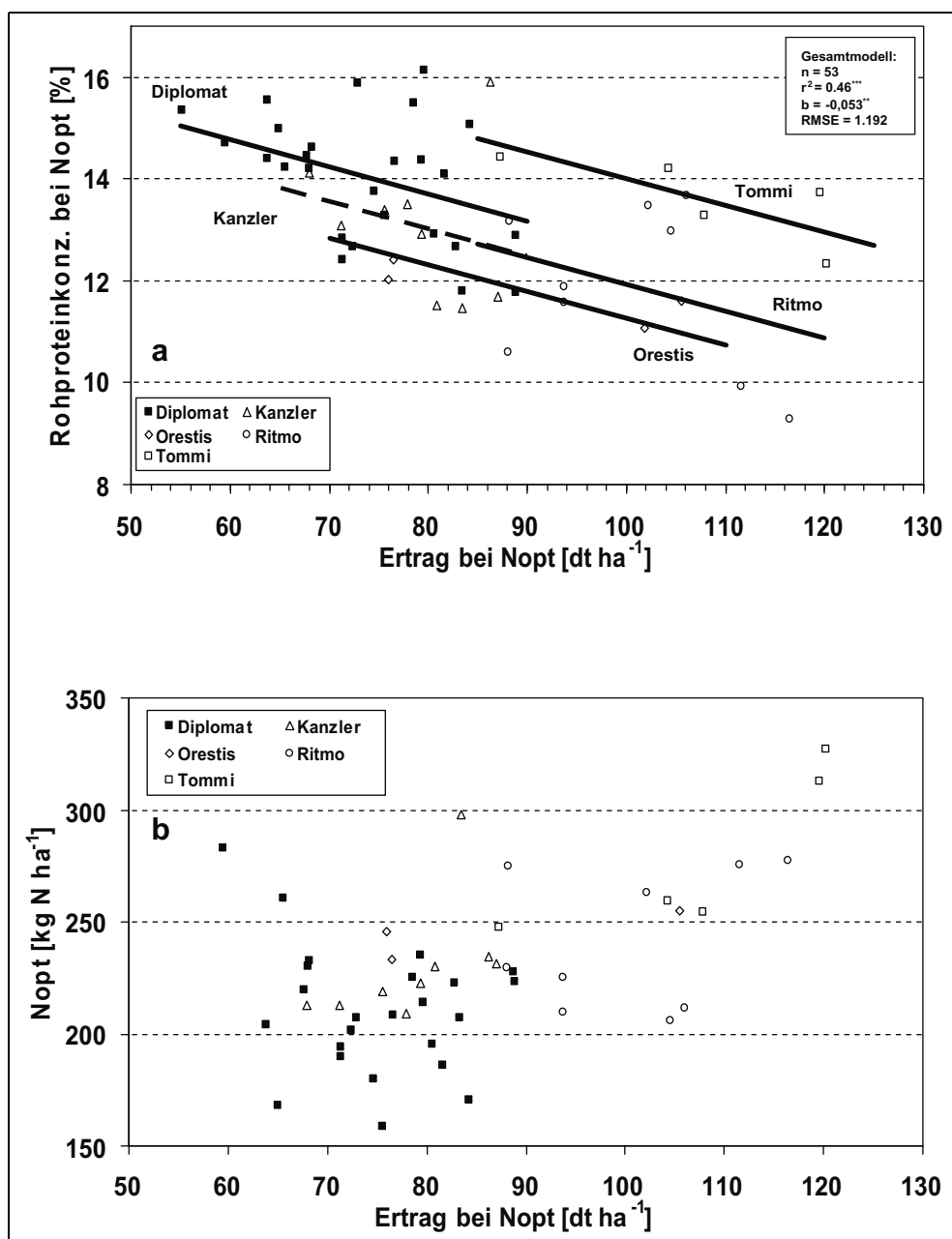


Abb. 2. Beziehung zwischen dem Ertrag bei optimaler N-Düngung und der Rohproteinkonzentration im Korn (a) sowie der Höhe der optimalen N-Düngung (b) (RMSE: Root Mean Square Error)

Relation between grain yield at optimal N fertilization and the grain protein concentration (a) and the optimal N fertilizer amount (b) (RMSE: Root Mean Square Error).

KUNZOVÁ und HEJCMAN (2010) die Erträge in den Nullparzellen im Zeitverlauf anstiegen.

Die ökonomisch optimale N-Düngung (Nopt) wurde aus den Ertragsfunktionen separat für jedes Jahr und jede Sorte unter der Annahme von 19 Euro je dt Weizen und 0,75 Euro je kg N abgeleitet und damit die entsprechenden Erträge (Yopt) geschätzt. An dieser Stelle sei darauf verwiesen, dass die Erträge und die Proteinkonzentrationen nicht auf der Basis der Teilgaben, sondern auf der Basis der N-Gesamtmenge geschätzt wurden. Sensibilitätsanalysen zeigten nur geringe Auswirkungen von variierenden Relationen der Faktor- und Produktpreise auf die Höhe der optimalen N-Düngung. Im Zeitverlauf stiegen die Erträge bei optimaler N-Düngung um 0,63 dt ha⁻¹ a⁻¹ an. Der züchterische Fortschritt spiegelt sich eindrucksvoll in der höheren Ertragsleistung der neueren Genotypen wider. Auch HEJCMAN und KUNZOVÁ

(2010) berichteten von einem jährlichen Ertragsanstieg von 0,73 dt ha⁻¹ in der mit 121 kg N ha⁻¹, 40 kg P ha⁻¹ und 71 kg K ha⁻¹ versorgten Variante, der aber vermutlich auf die Residualwirkung der Düngung in den Vorjahren zurückzuführen ist. FOULKES et al. (1998) stellten in ihren Versuchen fest, dass neuere Sorten höhere N-Mengen zur Erreichung des optimalen Ertrages benötigen. Diese Erkenntnis kann mit den vorliegenden Versuchsergebnissen nicht unterstützt werden, da der im Versuchsverlauf positive Ertragstrend nicht mit einer entsprechenden Erhöhung der dazu erforderlichen N-Menge einherging.

Der im vorliegenden Versuch beobachtete Ertragsanstieg kann prinzipiell auf verschiedenen Ursachen beruhen. Einerseits sind Verbesserungen in der Produktionstechnik wie Bestandesetablierung oder auch Pflanzenschutz denkbar. Durch adäquaten Pflanzenschutz wurde ver-

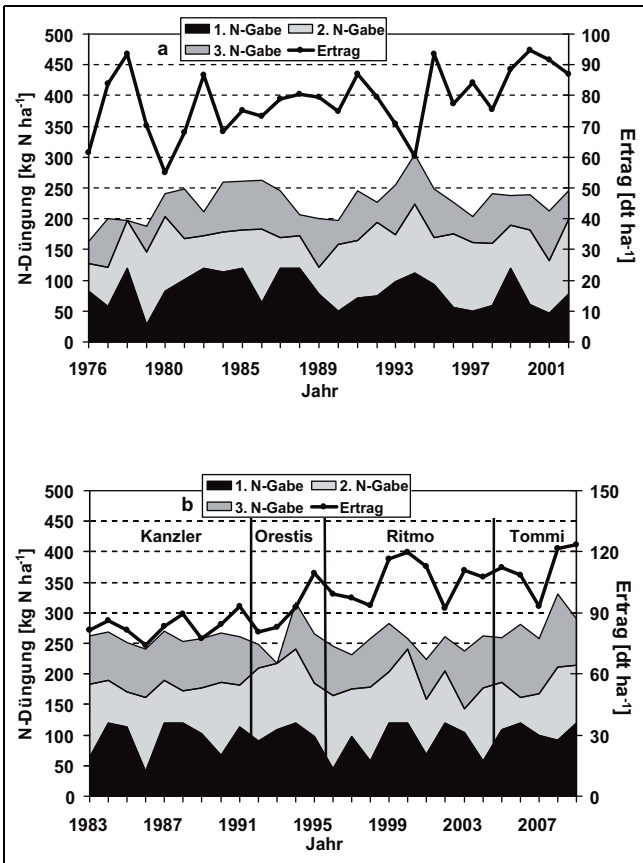


Abb. 3. Verlauf des Ertragsmaximums und der optimalen Aufteilung der N-Teilgaben bei Diplomat (a) und modernen Sorten (b) *Trend in grain yield maximum and optimal N fertilizer splitting in Diplomat (a) and modern genotypes (b).*

sucht, die Parzellen frei von Krankheiten und Schädlingen zu halten, so dass während der Laufzeit des Versuches kein gravierender Befall mit Schaderregern auftrat. Höhere physiologisch begründete Wirkungen modernerer Fungizide können nicht ausgeschlossen werden, scheinen aber nicht allein den beobachteten Ertragsanstieg

erklären zu können (BECK, 2005). Auch kam es im Zeitverlauf zu einer sukzessiven Vorverlegung des Aussaattermins um ca. 3 Wochen, allerdings ließ sich keine signifikante Korrelation zwischen Aussaattermin und Optimalertrag erkennen. Seit Versuchsbeginn hat sich die mit Hilfe einer in Versuchsnähe etablierten Wetterstation erhobene Jahresmitteltemperatur signifikant um 0,045 °C pro Jahr erhöht. Simulationen mit Hilfe eines Phänologiemodells (BÖTTCHER, unveröffentlicht) deuten einerseits auf einen früheren Vegetationsbeginn hin, der zu einer Verlängerung der Wachstumsperiode geführt haben könnte. Andererseits verringerte dieser Temperaturanstieg die Dauer der Kornfüllungsphase geringfügig um ca. 2 Tage, so dass aufgrund des im Versuchszeitraum gefundenen Temperaturtrends eher ein Ertragsrückgang als ein -anstieg zu erwarten gewesen wäre.

Parallel zum Temperaturanstieg ließ sich jedoch auch eine Zunahme der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre um 1,62 ppm a⁻¹ messen. Aufgrund der besseren Datenverfügbarkeit wurde auf die Werte der Station Mauna Loa auf Hawaii (KEELING et al., 2005) zurückgegriffen. Das UMWELTBUNDESAMT (2010) hatte einen ähnlichen Anstieg an ihrer Station Schauinsland registriert. Die Optimalerträge nahmen mit steigenden CO₂-Konzentrationen in der Atmosphäre um 0,40 dt (ha*ppm CO₂)⁻¹ zu. Unter der Annahme, dass es sich hierbei wirklich um einen kausalen Zusammenhang und nicht nur um eine Scheinkorrelation handelt, bedeutet dies, dass die Erhöhung der CO₂-Konzentration um 40 ppm in den letzten 25 Jahren den Ertrag um ca. 16 dt ha⁻¹ (+ 25%) gesteigert hat. Ein solcher Ertragsanstieg allein durch CO₂ erscheint allerdings wenig wahrscheinlich, zumal nach Ergebnissen aus FACE-Versuchen (Free Air Carbon dioxide Enrichment) eine um 170 ppm erhöhte CO₂-Konzentration den Weizenantrag nur um 19–27% steigerte (WEIGEL et al., 1994), was in etwa einem Ertragsanstieg von nur 0,1 dt ha⁻¹ ppm⁻¹ CO₂ entspräche. Der beobachtete Trend der Optimalerträge kann daher nicht allein auf Veränderungen der CO₂-Konzentrationen zurückgeführt werden.

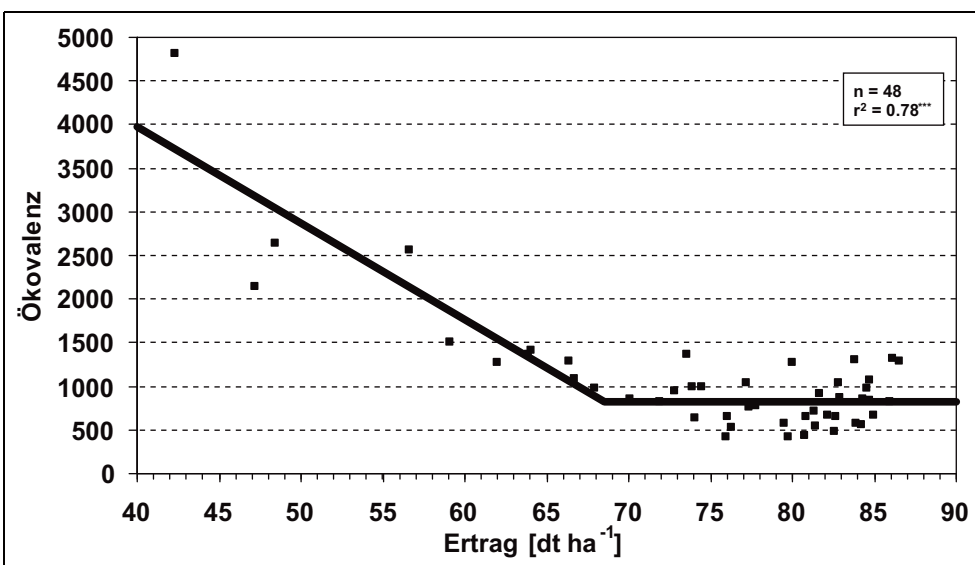


Abb. 4. Beziehung zwischen dem Ertrag und der Ökovalenz nach WRICKE (1962) *Relation between grain yield and ecovalence according to WRICKE (1962).*

Tab. 2. Weizenerträge (dt ha⁻¹) und deren Ökovalenz nach WRICKE (1962) (in Klammern) aus unterschiedlichen N-Düngungsvarianten mit bis zu drei Düngungsterminen (N1, N2, N3) (1976–2009, Mittel über alle Sorten)
Wheat grain yields (dt ha⁻¹) and their ecovalence according to WRICKE (1962) (in parentheses) in different N treatments (1976–2009, on average of all genotypes)

N2 kg N ha ⁻¹	N3 kg N ha ⁻¹	N1 (kg N ha ⁻¹)				Mittel dt ha ⁻¹
		0 dt ha ⁻¹	40 dt ha ⁻¹	80 dt ha ⁻¹	120 dt ha ⁻¹	
0	0	42,3 (4809)	56,7 (2568)	66,4 (1285)	76,0 (654)	60,3 (2329)
0	40	47,2 (2143)	61,9 (1277)	72,8 (946)	80,0 (1270)	65,5 (1409)
0	80	48,4 (2642)	64,0 (1420)	74,0 (642)	82,6 (653)	67,3 (1339)
40	0	59,1 (1499)	70,1 (846)	75,9 (415)	81,3 (713)	71,6 (869)
40	40	63,9 (1373)	73,9 (989)	79,5 (579)	84,2 (566)	75,4 (877)
40	80	66,7 (1080)	77,4 (756)	81,4 (542)	85,9 (829)	77,8 (802)
80	0	67,9 (971)	76,3 (523)	80,7 (427)	82,8 (1039)	76,9 (740)
80	40	71,9 (816)	79,8 (412)	82,6 (483)	84,9 (675)	79,8 (596)
80	80	73,6 (1359)	81,7 (919)	82,9 (869)	86,5 (1295)	81,2 (1111)
120	0	74,4 (993)	80,8 (657)	83,9 (582)	83,8 (1298)	80,7 (882)
120	40	77,2 (1040)	82,2 (664)	84,3 (851)	84,7 (1067)	82,1 (906)
120	80	77,8 (783)	84,6 (976)	84,7 (831)	86,1 (1317)	83,3 (977)
	0	61,0 (2068)	70,9 (1148)	76,7 (677)	81,0 (926)	72,4 (1205)
	40	65,0 (1343)	74,5 (836)	79,8 (715)	83,5 (894)	75,7 (947)
	80	66,6 (1466)	76,9 (1018)	80,8 (721)	85,3 (1024)	77,4 (1057)
0		46,0 (3198)	60,9 (1755)	71,1 (957)	79,5 (859)	64,4 (1695)
40		63,2 (1318)	73,8 (864)	78,9 (512)	83,8 (703)	74,9 (849)
80		71,1 (1049)	79,2 (618)	82,1 (593)	84,8 (1003)	79,3 (816)
120		76,5 (939)	82,5 (766)	84,3 (755)	84,9 (1227)	82,0 (922)
Mittel		64,2 (1626)	74,1 (1001)	79,1 (704)	83,3 (948)	

Die in Deutschland gültige Dünge-Verordnung schreibt u.a. die Ermittlung des Düngebedarfs unter Berücksichtigung der für die unter den jeweiligen Standort- und Anbaubedingungen zu erwartenden Erträge und Qualitäten vor. Dabei wird für Stickstoff ein linearer Zusammenhang zwischen Ertragsniveau und N-Düngebedarf unterstellt. Wie aus Abb. 2b sowie Abb. 3a + b hervor-

geht, kann eine solche Linearität an Hand des vorliegenden Datenmaterials nicht in dieser Stringenz belegt werden. Wie unzählige N-Steigerungsversuche belegen, korrelieren Ertrag und N-Düngebedarf innerhalb eines Jahres positiv, aber über verschiedene Umwelten (Jahre, Standorte) variiert der optimale N-Bedarf nicht zwangsläufig mit der Ertragshöhe, da häufig andere Wachstums-

faktoren ertragslimitierend wirken können. Demgegenüber konnten SYLVESTER-BRADLEY und KINDRED (2009) eine positive Korrelation zwischen der optimalen N-Düngung und dem Ertragsniveau auf Betriebsebene nachweisen.

Über die negative Beziehung zwischen Ertragsniveau und Proteinkonzentration wurde in der Literatur mehrfach berichtet (z.B. FEIL, 1998; TRIBOI und TRIBOI-BONDEL, 2001). Neben anderen möglichen Ursachen wie geringe Effizienz der pflanzeninternen Umverlagerung, Konkurrenz von Kohlenhydratsynthese und N-Metabolismus (Nitratreduktion) um Energie, Probleme beim Wurzelwachstum und der N-Aufnahmeleistung und N-Verluste der Pflanzen während der Kornfüllung verwies FEIL (1998) auch auf die Möglichkeit der mangelnden N-Verfügbarkeit während der Kornfüllungsphase. Abhilfe könnte durch eine Erhöhung der 3. N-Gabe zum Ährenschieben erreicht werden. Allerdings korreliert nach BÖTTCHER und KAGE (2009) der Kornertrag bei Weizen stark positiv mit der Strahlungssumme zwischen EC 50 und EC 75, so dass zum Zeitpunkt der Applikation der Ährengabe das Ertragsniveau nicht zuverlässig prognostiziert werden kann.

Literatur

- BECK, C.L., 2005: Einfluss von Fungiziden auf die Ertragsphysiologie von Weizen. Dissertation Bonn, (<http://hss.ulb.uni-bonn.de:90/2005/0537/0537.pdf>; 23.11.2010).
- BELL, M.A., R.A. FISCHER, D. BYERLEE, K. SAYRE, 1995: Genetic and agronomic contributions to yield gains: A case study for wheat. *Field Crop Research* **44**, 55-65.
- BÖTTCHER, U., H. KAGE, 2009: Analyse von witterungs- und Standorteinflüssen auf die Ertragsbildung. Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung der CAU Kiel **63**, 11-15.
- BRISSON, N., P. GATE, D. GOUACHE, G. CHARMET, F.-X. OURY, F. HUARD, 2010: Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France. *Field Crop Research* **119**, 201-212.
- BUNDESSORTENAMT, 1987: Beschreibende Sortenliste für Getreide, Mais, Ölfrüchte, Leguminosen und Hackfrüchte. Hannover, Verlag Alfred Strothe.
- CALDERINI, D.F., G.A. SLAFER, 1998: Changes in yield and yield stability in wheat during the 20th century. *Field Crop Research* **57**, 335-347.
- FEIL, B., 1998: Physiologische und pflanzenbauliche Aspekte der inversen Beziehung zwischen Ertrag und Proteinkonzentration bei Getreidesorten: Eine Übersicht. *Pflanzenbauwissenschaften* **2**, 37-46.
- FOULKES, M.J., R. SYLVESTER-BRADLEY, R.K. SCOTT, 1998: Evidence for differences between winter wheat cultivars in acquisition of soil mineral nitrogen and uptake and utilization of applied fertilizer nitrogen. *Journal of Agricultural Science* **130**, 29-44.
- FOULKES, M.J., J.W. SNAPE, V.J. SHERMAN, M.P. REYNOLDS, O. GAJU, R. SYLVESTER-BRADLEY, 2007: Genetic progress in yield potential in wheat: Recent advances and future prospects. *Journal of Agricultural Science* **145**, 17-29.
- HEJCMAN, M., E. KUNZOVÁ, 2010: Sustainability of winter wheat production on sandy-loamy Cambisol in the Czech Republic: Results from a long-term fertilizer and crop rotation experiment. *Field Crop Research* **115**, 191-199.
- HÜLSBERGEN, K.-J., B. FEIL, W. DIEPENBROCK, 2002: Rates of nitrogen application required to achieve maximum energy efficiency for various crops: Results of a long-term experiment. *Field Crop Research* **77**, 61-76.
- JOHNSTON, A.E., 1994: The Rothamsted classical experiments. In: Long-term experiments in agricultural and ecological sciences. (Eds.: LEIGH, R.A. und A.E. JOHNSTON) CAB International, Wallingford, 9-38.
- KEELING, C.D., S.C. PIPER, R.B. BACASTOW, M. WAHLEN, T.P. WHORF, M. HEIMANN, H.A. MEJER, 2005: Atmospheric CO₂ and ¹³CO₂ exchange with the terrestrial biosphere and oceans from 1978 to 2000: Observations and carbon cycle implications, In: A history of atmospheric CO₂ and its effects on plants, animals, and ecosystems. (Eds.: EHLERINGER, J.R., T.E. CERLING, M.D. DEARING), New York, Springer Verlag, 83-113.
- KÖRSCHENS, M., 2001: Ertragsentwicklung in Abhängigkeit von der Düngung im statischen Dauerdüngungsversuch Bad Lauchstädt im Verlaufe von 97 Jahren. *Archives of Agronomy and Soil Science* **47**, 53-72.
- KUNZOVÁ, E., M. HEJCMAN, 2010: Yield development of winter wheat over 50 years of nitrogen, phosphorus and potassium application on greyic Phaeozem in the Czech Republic. *European Journal of Agronomy* **33**, 166-174.
- MANDERSCHIED, R., A. PACHOLSKI, C. FRÜHAUF, H.J. WEIGEL, 2009: Effects of free air carbon dioxide enrichment and nitrogen supply on growth and yield of winter barley cultivated in a crop rotation. *Field Crop Research* **110**, 182-196.
- PELTONEN-SAINIO, P., L. JAUHAINEN, I.P. LAURILA, 2009: Cereal yield trends in northern European conditions: Changes in yield potential and its realisation. *Field Crop Research* **110**, 85-90.
- SIELING, K., 2001: N-Bilanzen und Ertragstrends in unterschiedlichen Produktionssystemen. *Pflanzenbauwissenschaften* **5**, 24-32.
- SYLVESTER-BRADLEY, R., D.R. KINDRED, 2009: Analysing nitrogen responses of cereals to prioritize routes to the improvement of nitrogen use efficiency. *Journal of Experimental Botany* **60**, 1939-1951.
- TRIBOI, E., A.M. TRIBOI-BONDEL, 2001: Environmental effects on wheat grain growth and composition. *Aspects of Applied Biology* **64**, 91-101.
- UMWELTBUNDESAMT, 2010: Atmosphärische CO₂-Konzentrationen an der Messstation Schauinsland des Umweltbundesamtes. <http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do?nodeIdent=2844>. (02.11.2010).
- WEIGEL, H.J., R. MANDERSCHIED, H.-J. JÄGER, G.J. MEJER, 1994: Effects of season-long CO₂ enrichment on cereals. I. Growth performance and yield. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **48**, 231-240.
- WRICKE, G., 1962: Über eine Methode zur Erfassung der ökologischen Streubreite in Feldversuchen. *Zeitschrift für Pflanzenzüchtung* **47**, 92-96.