

Die Ertragsbildung landwirtschaftlicher Kulturpflanzen in Abhängigkeit von der nutzbaren Feldkapazität bei differenzierter Stickstoffdüngung in Trockenjahren

E. Stickel, F.-X. Maidl, A. Ludwig und G. Fischbeck

Yield of maize and winter wheat as affected by available water capacity and N-fertilization in dry years

1. Einleitung

Der Zusammenhang zwischen nutzbarer Feldkapazität (nFK) und Ertrag wurde von einer Vielzahl von Autoren untersucht. Für Getreide und Mais stellten SCHRÖDER (1974), CAMPBELL et al. (1988), SCHROEDER und HALVORSON

(1988) sowie SIPPEL et al. (1993) Regressionsanalysen an, die hochsignifikante Ertragssteigerungen bei zunehmender nFK belegen. Mehrere Autoren weisen darauf hin, daß bei einer abnehmenden nutzbaren Feldkapazität nicht eine unzureichende Nährstoffversorgung, sondern im wesentlichen die verringerte Wasserverfügbarkeit zu einem Ertragsrückgang

Summary

In two dry years yield formation of maize and winter wheat was determined as affected by N-fertilization on soils of an available water capacity (awc) ranging between 30 mm and 240 mm in order to develop site specific N-fertilization strategies.

On soils with low awc maize reached highest yields (120 dt/ha up to 129 dt/ha) if the first N-application was applied at a plant height of 15 cm. A lower plant density stimulated yields on soils with low awc also. A starter fertilization > 60 kg N/ha, however, gave highest yield increases (> 0.44 dt/ha*mm nFK) with increasing awc.

Wheat reached highest yield (69 dt/ha) on soils with low awc and the highest yield increase with increasing awc (18.6 dt/ha*ln mm nFK) if moderate N-fertilization in early spring (30 kg N/ha) together with 60 kg N/ha in EC 30 were applied. A total amount of 160 kg N/ha was necessary over the whole range of the examined awc to achieve highest yields. Starter fertilization > 30 kg N/ha lowered yields.

Key words: Maize, winter wheat, nitrogen fertilizer, plant available water capacity, yield.

Zusammenfassung

In zwei Trockenjahren wurde die Ertragsbildung von Silomais und Winterweizen bei differenzierter N-Düngung auf Böden mit einer nutzbaren Feldkapazität (nFK) von 30 mm bis 240 mm untersucht, um an die nFK angepasste N-Düngungsstrategien zu entwickeln.

Mais erreichte bei niedriger nFK hohe Gesamttrockenmasseerträge (120 dt/ha bis 129 dt/ha), wenn die erste N-Gabe bei 15 cm Wuchshöhe ausgebracht wurde. Auch eine verringerte Pflanzenzahl/ha wirkte bei geringer nFK ertragssteigernd. Demgegenüber führte eine Startdüngung von 60 kg N/ha zu den höchsten Ertragssteigerungen (> 0.44 dt/ha*mm nFK) mit zunehmender nFK.

Winterweizen erreichte bei mäßiger Andüngung (30 kg N/ha) und einer zweiten Gabe von 60 kg N/ha in EC 30 bei einer Gesamt-N-Menge von 160 kg N/ha sowohl den Höchstertrag bei niedriger nFK (69 dt/ha) als auch mit 18.6 dt/ha*ln mm nFK die größte Ertragszunahme bei ansteigender nFK. Eine höhere Andüngung und eine geringere Gesamt-N-Menge wirkten ertragsmindernd.

Schlagworte: Mais, Winterweizen, Stickstoffdüngung, nutzbare Feldkapazität, Ertrag.

führt (BATCHELDER und JONES, 1972; IDE et al., 1987; SHAFFER et al., 1993). Allerdings wurde der Zusammenhang zwischen der nutzbaren Feldkapazität und dem Ertrag meist an erosionsgeschädigten Hängen untersucht, so daß der Wasserhaushalt durch laterale Interaktionen sowie Unterschiede in der Exposition und Inklination beeinflusst war (STONE et al., 1985; STICKSEL und WOLF, 1988).

Die Mehrzahl der Untersuchungen beschränkt sich auf die Beschreibung des Zusammenhanges zwischen Ertrag und nutzbarer Feldkapazität, ohne daraus angepaßte pflanzenbauliche Maßnahmen abzuleiten. Allerdings stellt sich derzeit die Forderung, insbesondere bezüglich der N-Düngung Empfehlungen auszuarbeiten, die den kleinräumigen Variationen des Ertragspotentials Rechnung tragen. Gerade dadurch ergeben sich grundlegend neue Möglichkeiten einer stärker standortangepassten und ressourcenschonenden Landbewirtschaftung. Beispielhaft dazu sollen in den vorgestellten Untersuchungen N-Düngungsempfehlungen zu Silomais und Winterweizen für Flächen aufgezeigt werden, deren Ertragspotential ganz wesentlich von der kleinräumig wechselnden nFK abhängt. Zu diesem Zweck wurden Versuche mit unterschiedlicher N-Düngung auf Böden mit stark variierendem Wasserspeichervermögen vorgenommen. Entgegen herkömmlichen Versuchsanstellungen wurden die Parzellenversuche in einer extrem heterogenen Auenlandschaft durchgeführt.

2. Material und Methoden

2.1 Versuchsstandort

In den Jahren 1990 und 1991 wurden südlich der Stadt Augsburg im Bereich der Lechauen Stickstoffsteigerungsversuche zu Silomais und Winterweizen angelegt. In dem völlig ebenen Untersuchungsgebiet finden keine oberflächigen oder oberflächennahen Zu- und Abflüsse statt. Zudem ist eine Beeinflussung des Bodenwasserhaushaltes durch kapillaren Wasseraufstieg ausgeschlossen, da der Grundwasserleiter ca. 3 m unter der Geländeoberfläche in quartären Schottern liegt (RÖDER und EDEN, 1988).

Die vorherrschenden Bodentypen sind graue Auenrendzinen aus einer feinsandigen bis schluffigen Auenlehmmauflage, deren nutzbare Feldkapazität in Abhängigkeit von der Mächtigkeit der Auenlehmmauflage von ca. 30 mm bis 240 mm reicht. Zur Bestimmung der nFK wurden auf tiefgründigen Teilflächen ungestörte Stechzylinderproben aus der maximal 1 m mächtigen Evapotranspirationszone

entnommen (HARTGE und HORN, 1989). Auf extrem flachgründigen Teilflächen wurde die nutzbare Feldkapazität aus der Körnung des Feinbodens abgeschätzt (BODENKUNDLICHE KARTIERANLEITUNG, 1982); zusätzlich wurden mit einem Riverside-Bohrer (Innendurchmesser: 10 cm) ca. 15 Liter Boden aus der Krume entnommen, der Kiesgehalt gravimetrisch bestimmt und anschließend in Volumenprozent umgerechnet. Die nutzbare Feldkapazität wurde um das Volumen des Kiesanteiles korrigiert.

Die nach der CAL-Methode im Feinboden der Krume bestimmten P_2O_5 - und K_2O -Gehalte lagen ausnahmslos im Bereich der Versorgungsstufe hoch bis sehr hoch (ANONYM, 1985).

Der C_{org} -Gehalt, bestimmt mit einem Kohlenstoff-Schwefel-Analyzer (Fa. WÖSTHOFF), in der Krume tiefgründiger Bereiche belief sich auf 1.8 % gegenüber 3.0 % auf flachgründigen Bereichen. Die Gesamt-N-Gehalte (Bestimmung nach KJELDAHL) lagen auf tiefgründigen Böden mit 0.15 % unter denen der flachgründigen Böden (0.25 %). Bei Berücksichtigung des Kiesanteiles ergaben sich gleiche absolute Gesamt-N- und C_{org} -Mengen je Hektar.

2.2 Versuchsdurchführung

Die Versuchspartellen wurden auf Praxisschlägen eingerichtet, in denen sowohl tief- als auch flachgründige Böden vertreten waren, deren extrem kleinräumiger Wechsel in einem Raster von 5 m x 5 m erfaßt wurde. Die Versuche wurden ähnlich einer Spaltanlage angelegt, bei denen der Faktor N-Düngung in Großteilstücken geprüft wurde, während die nutzbare Feldkapazität aufgrund der extrem heterogenen Bodenbedingungen innerhalb der Großteilstücke zufällig verteilt vorlag. Parzellen mit uneinheitlicher nFK wurden von der Verrechnung ausgeschlossen.

Silomais

Ein Unwetter führte im September 1990 zu einem erheblichen Ernteausschlag, so daß für Silomais nur das Versuchsjahr 1991 zur Auswertung kam. Die Saat (Sorte Iglu) erfolgte nach der Ernte der Vorfrucht Futterroggen (9. 5.) relativ spät am 21. 5. Bei einer Parzellengröße von 30 m² wurden die in Tabelle 1 dargestellten Düngungsvarianten angelegt.

Zur Bestimmung des Einflusses der Stickstoffdüngung auf die Jugendentwicklung wurde drei Wochen nach dem zweiten Düngungstermin bei ca. 60 cm Wuchshöhe des

Tabelle 1: N-Düngungsvarianten bei Silomais (Sorte Iglu, FAO-Zahl 210)

Table 1: N-fertilizer treatments for maize (Variety Iglu, FAO 210)

Variante	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Entw. Stadium	N-Düngermenge je Gabe (kg N/ha)									
Saat	-	80	80	40	-	60	-	80	80	60
15 cm Wuchshöhe	-	-	-	40	80	60	120	80	80	60
50 cm Wuchshöhe	-	-	-	-	-	-	-	-	-	40
Verteilung	-	b ¹⁾	R ²⁾	R	R	R	R	b	R	R
Σ kg N/ha	0	80				120			160	
Düngerart	-	KAS					RiGü ³⁾	KAS		

¹⁾ breitflächig²⁾ Reihendüngung³⁾ Rindergülle mit 120 kg Gesamt-N, davon 60 kg NH₄-N

Maies eine Zwischenbeerntung vorgenommen. Dabei wurden je Parzelle zwölf Pflanzen herausgeschnitten.

Zur Erntereife wurde der Trockenmasseertrag, unterteilt nach Kolben und Restpflanze, an zwei Reihen zu je 5 m ermittelt. Zusätzlich wurde die Bestandesdichte ausgezählt.

Winterweizen

Winterweizen (Sorte Ares) wurde jeweils Mitte Oktober nach der Vorfrucht Silomais (1989) bzw. Körnermais (1990) in einer Saatstärke von 420 Körner/m² (1989) bzw. 400 Körner/m² (1990) gedreht. Bei einer Parzellengröße von 19,4 m² wurden die in Tabelle 2 dargestellten Düngungsvarianten angelegt.

Im erntereifen Zustand wurden Schnittproben (0,25 m²) entnommen, um die Ertragsstrukturkomponenten Ähren/m² und Kornzahl/Ähre zu bestimmen. Das Tausendkorngewicht sowie der Kornertrag wurden an einer Mähdruschprobe ermittelt. Der Kornertrag ist auf 86 % Feuchte umgerechnet.

2.3 Rechenverfahren

Die Abhängigkeit des Ertrages von der nutzbaren Feldkapazität wurde über Korrelations- und Regressionsanalysen mit Hilfe des Statistikpaketes SAS bestimmt (SAS INSTITUTE INC., 1985). Dabei wurden sowohl lineare als auch nichtlineare Ertragsfunktionen untersucht. Für Silomais errechneten sich die höchsten Bestimmtheitsmaße in linearen Regressionen, während bei Winterweizen logarithmische Funktionen (gedüngte Varianten) den Zusammenhang am besten beschrieben.

Die Interpretation der Regressionsgeraden ist nur für das untersuchte Intervall der nutzbaren Feldkapazitäten von 30 mm bis 240 mm angebracht. Deshalb wurden die Geradengleichungen für den Kleinstwert der unabhängigen Variablen (nFK = 30 mm) transformiert, so daß die in den Tabellen 5 und 7 wiedergegebenen Startwerte den Erträgen bei 30 mm nFK entsprechen.

Tabelle 2: N-Düngungsvarianten bei Winterweizen (Sorte Ares)

Table 2: N-fertilizer treatments for winter wheat (Variety Ares)

Variante	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
EC-Stadium	N-Düngermenge je Gabe (kg N/ha)										
EC 13 (VB)	-	50	-	50	50	-	120	80	30	60	60
EC 25	-	-	50	-	-	50	-	-	-	-	-
EC 30	-	-	-	-	40	-	-	40	60	30	-
EC 32	-	30	-	40	-	40	-	-	40	40	30
EC 39	-	-	30	30	30	30	-	-	30	30	40
EC 49	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30
Σ kg N/ha	0	80			120					160	
Düngerart	-	KAS					Alzon			KAS	

2.4 Witterung

Die klimatischen Verhältnisse sind bei Jahresniederschlägen von 857 mm und einer Durchschnittstemperatur von 8.2° C als warmgemäßigt und immerfeucht mit alpinem Einfluß zu bezeichnen (HÄCKEL, 1986). Beide Versuchsjahre waren durch milde Winter sowie überdurchschnittlich

hohe Temperaturen zu Vegetationsbeginn gekennzeichnet (Tab. 3). Im Jahr 1990 lagen zudem die Temperaturen während der Vegetationszeit über dem langjährigen Mittel. Die Niederschläge fielen in beiden Versuchsjahren deutlich unterdurchschnittlich aus, lediglich im Juni wurde das langjährige Mittel jeweils deutlich überschritten (Tab. 3).

Tabelle 3: Niederschlags- (N) und Lufttemperaturdaten (T) im Untersuchungszeitraum
Table 3: Precipitation (N) and air temperature (T) during the trial period

	Nov	Dez	Jan	Feb	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug	Σ
N 1989/90 (mm)	52.2	12.9	22.9	82.1	37.9	92.6	53.7	172.7	51.6	34.6	613
N 1990/91 (mm)	72.2	49.3	40.3	15.5	22.5	32.2	88.7	178.0	85.5	41.1	625
N langj. Mittel	53	48	49	48	47	63	93	122	112	98	733
											Ø
T 1989/90 (°C)	1.1	1.4	-0.7	4.9	6.4	6.6	14.1	15.3	17.1	18.5	8.5
T 1990/91 (°C)	3.7	0.6	0.6	-3.4	5.7	7.0	8.9	14.5	19.3	18.3	7.5
T langj. Mittel	3.4	-0.1	-1.3	0.1	3.8	7.8	12.4	15.8	17.5	16.7	7.6

3. Ergebnisse

3.1 Silomais

3.1.1 Jugendentwicklung

Der Trockenmasseertrag lag acht Wochen nach der Saat (ca. 60 cm Wuchshöhe des Mais) auf tiefgründigen Böden (nFK > 100 mm) im Mittel der untersuchten Varianten mit 23.7 dt/ha nur geringfügig über dem Ertragsmittel der flachgründigen Böden (nFK < 40 mm) von 22.1 dt/ha (Tab. 4). Offensichtlich reichte bis zu diesem Termin die Niederschlagshöhe aus, um bodenbedingte Unterschiede im Wasserspeichervermögen auszugleichen. Zudem ist der Wasserbedarf der jungen Maispflanzen in diesem Entwicklungsabschnitt noch gering.

Auf flachgründigen Böden zeichnete sich eine tendenzielle, statistisch nicht absicherbare Abhängigkeit des Ertrages von der N-Düngung ab. So wurden überdurchschnittlich hohe Trockenmasseerträge von > 25 dt/ha nur bei einer hohen Andüngung mit 80 kg N/ha zur Saat gemessen (Tab. 4). Bei unterlassener Andüngung (Var. 5; Var. 7) oder geringer

Andüngung (Var. 4) fiel der Ertrag dagegen unterdurchschnittlich aus. Auf tiefgründigen Böden war die Reaktion des Ertrages auf die N-Düngung weniger einheitlich (Tab. 4). Die in beiden Gründigkeitsgruppen geringe Ertragshöhe der Güllevariante ist wahrscheinlich auf Pflanzenschädigungen bei der Gülleeinbringung zurückzuführen; dies bestätigen auch Ergebnisse von VALTA und MAIDL (1995).

Insgesamt bleibt festzuhalten, daß eine hohe Andüngung die Jugendentwicklung auf flachgründigen Böden begünstigte. Auf tiefgründigen Böden war bis zu diesem Stadium lediglich für Varianten mit einer Reihendüngung zur Saat ein leichter Ertragsvorteil zu verzeichnen.

3.1.2 Siloreife

Aufgrund einer unterdurchschnittlichen Bestandesdichte ist für die Variante mit Gülledüngung (Var. 7) eine gesonderte Betrachtung angebracht. Die Gülledüngung erfolgte bei ca. 15 cm Wuchshöhe und war mit einer sofortigen Einarbeitung verbunden. Dabei wurden die in diesem

Tabelle 4: Trockenmasseertrag (dt/ha) von Silomais bei 60 cm Wuchshöhe in Abhängigkeit von der N-Düngungsvariante bei unterschiedlicher nutzbarer Feldkapazität

Table 4: Dry matter yield (dt/ha) of maize at a plant height of 60 cm as affected by N-fertilizer treatment and plant available water capacity

Variante	1	2	4	5	7	8	9	
kg N/ha	0	80 R ¹⁾	40-40 R	0-80 R	0-120 RiGü ²⁾	80-80 b ³⁾	80-80 R	Ø
nFK < 40 mm	15.8	25.7	21.6	18.3	16.2	25.4	31.8	22.1
nFK > 100 mm	18.5	27.8	27.9	24.3	14.7	23.4	29.3	23.7

¹⁾ Reihendüngung

²⁾ Rindergülle mit 120 kg Gesamt-N, davon 60 kg NH₄-N

³⁾ breitflächig

Stadium empfindlichen Maispflanzen z. T. verletzt, so daß die Bestandesdichte bei der Ernte mit 8.4 Pflanzen/m² gegenüber den mineralisch gedüngten Varianten (9.9 bis 10.2 Pflanzen/m²) signifikant vermindert war. Bei diesen niedrigen Pflanzenzahlen war offensichtlich der Einfluß der Wasserversorgung auf die Ertragsbildung weniger stark ausgeprägt. Der mit 129.5 dt/ha hohe Startwert der Regressionsgeraden für den Gesamttrockenmasseertrag weist darauf hin, daß sich die geringe Bestandesdichte auf den flachgründigen Böden günstig auf die Ertragsbildung auswirkte (Tab. 5). Allerdings zeigt die geringe Steigung der Regressionsgeraden (0.17 dt/ha*mm nFK), daß bei höherer nutzbarer Feldkapazität die Pflanzenzahl nicht ausreichte, um das Ertragspotential auszuschöpfen.

Die Ertragshöhe konnte auf flachgründigen Böden durch die unterschiedlichen N-Düngermengen und -verteilungen und auch, wie sich bei der Güllevariante zeigt, durch die Pflanzenzahl/ha ganz entscheidend beeinflusst werden. So weist der Vergleich der Düngungsvarianten eine große Spannweite der Startwerte des Gesamttrockenmasseertrages auf, die von 83.4 dt/ha (Var. 3) bis 129.5 dt/ha (Var. 7) reichte (Tab. 5). Ein hoher Startwert des Gesamttrockenmasseertrages war jeweils an einen hohen Startwert des Kolbentrockenmasseertrages gebunden (Tab. 5), so daß die düngungsbedingte Differenzierung in der Ertragshöhe im wesentlichen auf Unterschieden im Kolbenenertrag beruhte. Dabei reichte die Spanne der Kolbentrockenmasseerträge von 39.4 dt/ha (Var. 3) bis 78.3 dt/ha (Var. 7), während die Restpflanzenerträge mit 44.0 dt/ha (Var. 3) bis 54.1 dt/ha (Var. 5) erheblich schwächer differenzierten (Tab. 5).

Der Kolbenenertrag ließ sich auf flachgründigen Böden durch eine verzögert ausgebrachte N-Düngung steigern. So ergibt sich beim Vergleich der Varianten 2 und 3 (80 kg N/ha zur Saat breitflächig bzw. zur Reihe) mit der Variante 5 (80 kg N/ha bei 15 cm Wuchshöhe) eine deutliche Zunahme des Startwertes des Kolbentrockenmasseertrages, der von 51.6 dt/ha bzw. 39.4 dt/ha (Var. 2 bzw. Var. 3) auf 68.5 dt/ha (Var. 5) ansteigt (Tab. 5). Die Erhöhung des Startwertes für den Restpflanzenertrag fiel dagegen erheblich geringer aus. Auch eine schwache Andüngung mit nur 40 kg N/ha (Var. 4) hatte auf flachgründigen Böden einen überdurchschnittlichen Kolbenenertrag zur Folge (Tab. 5). Festzuhalten bleibt, daß durch eine unterlassene oder schwache N-Düngung zur Saat bei niedriger nFK die höchsten Kolbenenerträge und folglich auch die höchsten Gesamttrockenmasseerträge erreicht wurden.

Neben den Startwerten wurden auch die Geradensteigungen durch die unterschiedlichen N-Düngermengen

Tabelle 5: Regressionsfunktionen der Gesamttrockenmasseerträge (y1 [dt/ha]), Kolbentrockenmasseerträge (y2[dt/ha]) sowie Restpflanzenerträge (y3[dt/ha]) in Abhängigkeit von der nutzbaren Feldkapazität (x[mm]) bei differenzierter N-Düngung

Table 5: Regression functions of total dry matter yield (y1[dt/ha]), cob dry matter yield (y2[dt/ha]) and rest biomass (y3[dt/ha]) as affected by plant available water capacity (x[mm]) and N-fertilizer treatment

Variante	Ertragsfunktion	r ²	Signifikanz
1 ohne N	y1 = 86.1 + 0.39 (x-30) y2 = 40.8 + 0.29 (x-30) y3 = 45.4 + 0.10 (x-30)	0.62 0.68 0.25	*** *** n.s.
2 80 kg N/ha breitflächig	y1 = 99.7 + 0.51 (x-30) y2 = 51.6 + 0.38 (x-30) y3 = 48.1 + 0.13 (x-30)	0.50 0.52 0.35	** ** *
3 80 kg N/ha zur Reihe	y1 = 83.4 + 0.51 (x-30) y2 = 39.4 + 0.35 (x-30) y3 = 44.0 + 0.16 (x-30)	0.86 0.88 0.71	*** *** ***
4 40-40 kg N/ha zur Reihe	y1 = 117.9 + 0.33 (x-30) y2 = 66.4 + 0.21 (x-30) y3 = 51.5 + 0.12 (x-30)	0.78 0.68 0.77	*** ** ***
5 0-80 kg N/ha zur Reihe	y1 = 122.3 + 0.38 (x-30) y2 = 68.5 + 0.25 (x-30) y3 = 54.1 + 0.14 (x-30)	0.52 0.59 0.35	** ** *
6 60-60 kg N/ha zur Reihe	y1 = 115.8 + 0.44 (x-30) y2 = 65.1 + 0.25 (x-30) y3 = 50.4 + 0.18 (x-30)	0.43 0.34 0.57	** * ***
7 0-120 kg N/ha als Gülle	y1 = 129.5 + 0.17 (x-30) y2 = 78.3 + 0.10 (x-30) y3 = 51.2 + 0.07 (x-30)	0.41 0.45 0.22	* * n.s.
8 80-80 kg N/ha breitflächig	y1 = 109.0 + 0.58 (x-30) y2 = 62.9 + 0.35 (x-30) y3 = 46.0 + 0.23 (x-30)	0.66 0.64 0.67	*** *** ***
9 80-80 kg N/ha zur Reihe	y1 = 105.5 + 0.54 (x-30) y2 = 60.7 + 0.31 (x-30) y3 = 44.8 + 0.23 (x-30)	0.90 0.83 0.91	*** *** ***
10 60-60-40 kg N/ha zur Reihe	y1 = 107.6 + 0.55 (x-30) y2 = 60.2 + 0.34 (x-30) y3 = 47.4 + 0.21 (x-30)	0.79 0.75 0.72	*** *** ***
alle	y1 = 107.8 + 0.43 (x-30) y2 = 59.5 + 0.28 (x-30) y3 = 48.3 + 0.15 (x-30)	0.52 0.47 0.48	*** *** ***

und -verteilungen beeinflusst. Somit haben die Maisbestände in Abhängigkeit von der Düngungsvariante die bessere Wasserversorgung bei erhöhter nFK in sehr unterschiedlichem Maße genutzt. Die Steigungen der Regressionsgeraden des Gesamttrockenmasseertrages reichten von 0.17 dt/ha*mm nFK (Var. 7) bis 0.58 dt/ha*mm nFK (Var. 8) (Tab. 5). Die Unterschiede ließen sich auf die Terminierung der N-Düngung zurückführen. Bei unterlassener Andüngung (Var. 5; Var. 7) oder schwacher Andüngung (Var. 4) lagen die Steigungen unter 0.4 dt/ha*mm nFK, während für die weiteren Düngungsvarianten Steigungen > 0.4 dt/ha*mm nFK errechnet wurden (Tab. 5). Die Abstufung der Geradensteigungen des Gesamttrockenmasseertrages entsprach im wesentlichen der Abfolge der Steigungen des Kolbenenertrages (Tab. 5). Dabei reichte die Spanne der Steigungen des Kolbenenertrages von 0.10 dt/ha*mm nFK bis 0.38 dt/ha*mm nFK, während die Steigungen für den Rest-

pflanzenenertrag zwischen 0.07 dt/ha*mm nFK und 0.23 dt/ha*mm nFK in engeren Grenzen schwankten (Tab. 5). Insgesamt übertraf die Steigung des Kolbenenertrages mit durchschnittlich 0.28 dt/ha*mm nFK die des Restpflanzenertrages (0.15 dt/ha*mm nFK). Der Kolbenenertrag hat somit von einer verbesserten Wasserversorgung stärker profitiert als der Restpflanzenertrag (Tab. 5).

Aus der Extrapolation der Geraden auf den Höchstwert der nutzbaren Feldkapazität von 200 mm ergeben sich Hinweise, mit welchem Düngungsregime bei hoher nFK die höchsten Gesamttrockenmasseerträge zu erzielen sind. Es zeigt sich, daß ein Gesamttrockenmasseertrag von > 190 dt/ha nur erreicht werden konnte, wenn eine Andüngung in Höhe von mindestens 60 kg N/ha zur Saat in Kombination mit einer ergänzenden Düngung bei 15 cm Wuchshöhe verabreicht wurde (Tab. 5).

Unter dem Einfluß der Sommertrockenheit wirkte eine hohe Andüngung auf flachgründigen Böden ertragsmindernd, während auf tiefgründigen Böden eine hohe Andüngung zur Ausschöpfung des Ertragspotentials unerlässlich war. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 1 dargestellt. Bis zu einer nFK von 80 mm wird bei unterlassener Andüngung (Var. 7) ein höherer Gesamttrockenmasseertrag erzielt als bei einer Andüngung von 80 kg N/ha (Var. 8). Allerdings wird deutlich, daß selbst im Trockenjahr 1991 ab einer nFK > 80 mm der Verzicht auf eine Andüngung zu Ertragseinbußen führte (Abb. 1).

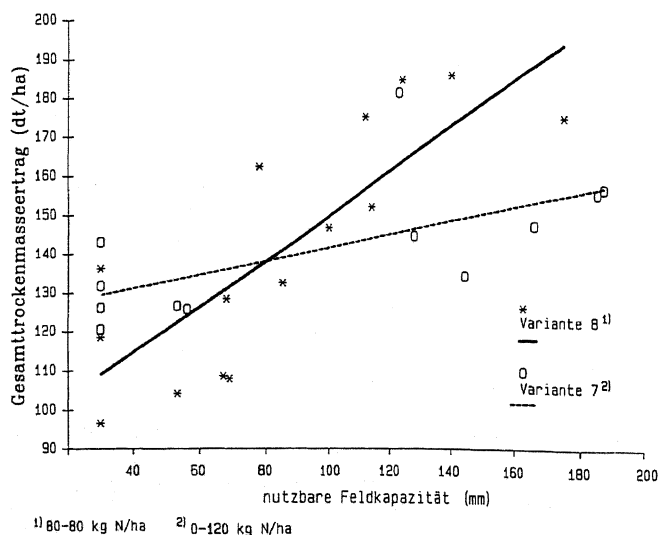


Abbildung 1: Gesamttrockenmasseertrag von Mais in Abhängigkeit von der nutzbaren Feldkapazität bei unterschiedlichen N-Düngungsvarianten

Figure 1: Total dry matter yield of maize as affected by plant available water capacity for different N-fertilizer treatments

3.2 Winterweizen

3.2.1 Ertragsstrukturparameter – Bestandesdichte, Kornzahl pro Ähre, Tausendkorngewicht

Die Ausbildung der Ertragsstrukturparameter Bestandesdichte und Kornzahl pro Ähre zeigte eine deutliche Abhängigkeit von der nFK. Auf Böden mit niedriger nFK erreichte die Bestandesdichte im Mittel der Varianten und Versuchsjahre lediglich 392 Ähren/m² gegenüber 438 Ähren/m² auf Böden mit hoher nFK (Tab. 6). Die niedrigeren Bestandesdichten auf flachgründigen Böden waren nicht auf eine gegenüber tiefgründigen Böden stärkere Reduktion der Triebzahlen zwischen Ende Bestockung und Ernte zurückzuführen, sondern ergaben sich als Folge eines geringeren Feldaufganges und einer geringeren Bestockung (LUDWIG, 1993).

Trotz der niedrigen Bestandesdichte auf flachgründigen Böden konnten die Weizenpflanzen bei geringer nFK lediglich 31.6 Körner/Ähre gegenüber 37.7 Körnern/Ähre auf tiefgründigen Böden ausbilden (Tab. 6). Unterschiede in der Kornzahl/Ähre zwischen den Gründigkeitsgruppen sind demzufolge nicht als eine Folge veränderter Konkurrenzbedingungen zwischen den Einzelpflanzen in der jeweiligen Gründigkeitsgruppe aufzufassen, sondern die Folge der ungünstigeren Wachstumsbedingungen auf flachgründigen Böden. Bezüglich des Tausendkorngewichtes waren keine Unterschiede zwischen den Gründigkeitsgruppen zu verzeichnen. Mit 45.1 g bzw. 45.6 g wurden jeweils annähernd gleiche Tausendkorngewichte ermittelt (Tab. 6).

Tabelle 6: Bestandesdichte, Kornzahl/Ähre und Tausendkorngewicht von Winterweizen zur Ernte

Table 6: Plant density, kernel/ear and thousand grain weight of winter wheat at harvest

Variante	Bestandesdichte (Pflanzen/m ²)		Kornzahl/Ähre		Tausendkorngewicht (g)	
nFK	< 40 mm	> 100 mm	< 40 mm	> 100 mm	< 40 mm	> 100 mm
1	353	373	17.5	31.5	42.1	43.3
2	399	451	30.9	36.1	43.9	45.4
3	401	451	28.3	36.4	46.7	46.7
4	372	434	33.3	40.6	44.7	45.8
5	387	479	31.0	35.5	47.8	45.6
6	340	420	41.0	39.6	41.6	46.2
7	425	430	29.7	34.6	46.5	44.9
8	382	416	31.8	37.2	44.4	44.6
9	388	474	40.2	40.2	44.5	46.5
10	413	476	33.9	40.6	47.0	46.0
11	451	419	30.4	42.2	47.3	46.6
Ø	392	438	31.6	37.7	45.1	45.6

3.2.2 Kornertrag

Die Spannweite der Startwerte des Kornertrages reichte von 50.7 dt/ha (Var. 7) bis 69.3 dt/ha (Var. 9) (Tab. 7). Dabei ließ die Ertragshöhe auf flachgründigen Böden eine Abhängigkeit insbesondere von der N-Düngermenge, aber auch von der N-Düngerart erkennen. So stieg mit zunehmendem Einsatz von Kalkammonsalpeter der Kornertrag auf flachgründigen Böden an. Die Startwerte der mit einer N-Menge von 80 kg N/ha gedüngten Varianten erreichten 52.4 dt/ha (Var. 3) und 53.1 dt/ha (Var. 2), während bei 120 kg N/ha die Startwerte mit 58.4 dt/ha (Var. 5) bis 62.0 dt/ha (Var. 4) deutlich höher ausfielen. Die Startwerte der Varianten mit einer N-Aufwandmenge von 160 kg N/ha nahmen mit 62.3 dt/ha (Var. 11) bis 69.3 dt/ha (Var. 9) die Höchstwerte aller N-Düngungsvarianten an (Tab. 7). Lediglich die Varianten mit einer ausschließlichen Alzondüngung in Höhe von 120 kg N/ha (Var. 7; Var. 8) bildeten hierbei eine Ausnahme. Mit 50.7 dt/ha (Var. 7) und 53.0 dt/ha (Var. 8) fielen die Erträge dieser Varianten auf flachgründigen Böden deutlich unterdurchschnittlich aus (Tab. 7). Dazu ist zu bemerken, daß beide Varianten bereits zu Vegetationsbeginn hohe N-Gaben von 80 kg N/ha (Var. 8) bzw. 120 kg N/ha (Var. 7) erhielten. Dies führte in beiden Versuchsjahren zu sehr hohen Bestandesdichten zum Ende der Bestockung (LUDWIG, 1993), die allerdings bis zur Ernte wieder auf durchschnittliche Werte reduziert wurden (Tab. 6).

Auf flachgründigen Böden wurden die höchsten Erträge erreicht, wenn bei einer Gesamt-N-Menge von 160 kg N/ha bis zum Stadium EC 30 eine Menge von 90 kg N/ha

Tabelle 7: Regressionsfunktionen des Kornertrages (y [dt/ha]) von Winterweizen in Abhängigkeit von der nutzbaren Feldkapazität (x [mm]) bei differenzierter N-Düngung

Table 7: Regression functions of grain yield (y [dt/ha]) for winter wheat as affected by plant available water capacity (x [mm]) and N-fertilizer treatment

Variante	Ertragsfunktion	r^2	Signifikanz
1 ohne N	$y = 27.3 + 0.0015(x^2 - 302)$	0.77	***
2 80 kg N/ha (50-0-0-30-0-0)	$y = 53.1 + 17.1(\ln x - \ln 30)$	0.83	***
3 80 kg N/ha (0-50-0-0-30-0)	$y = 52.4 + 15.4(\ln x - \ln 30)$	0.85	***
4 120 kg N/ha (50-0-0-40-30-0)	$y = 62.0 + 15.5(\ln x - \ln 30)$	0.68	***
5 120 kg N/ha (50-0-40-0-30-0)	$y = 58.4 + 15.4(\ln x - \ln 30)$	0.78	***
6 120 kg N/ha (0-50-0-40-30-0)	$y = 61.5 + 17.2(\ln x - \ln 30)$	0.78	***
7 120 kg N/ha (120 Alzon)	$y = 50.7 + 13.1(\ln x - \ln 30)$	0.64	***
8 120 kg N/ha (80-0-40 Alzon)	$y = 53.0 + 13.8(\ln x - \ln 30)$	0.57	***
9 160 kg N/ha (30-0-60-40-30-0)	$y = 69.3 + 18.6(\ln x - \ln 30)$	0.76	***
10 160 N/ha (60-0-30-40-30-0)	$y = 65.6 + 17.2(\ln x - \ln 30)$	0.72	***
11 160 kg N/ha (60-0-0-30-40-30)	$y = 62.3 + 16.6(\ln x - \ln 30)$	0.78	***

ausgebracht wurde (Var. 9; Var. 10). Bei gleicher Gesamt-N-Menge war dabei eine verhaltene Andüngung von 30 kg N/ha zu Vegetationsbeginn mit einer zweiten N-Gabe von 60 kg N/ha zu EC 30 (Var. 9) günstiger als eine hohe Andüngung von 60 kg N/ha (Var. 10) (Tab. 7).

Die überdurchschnittlichen Startwerte der Varianten mit einer N-Menge von 160 kg N/ha (Var. 9; Var. 10; Var. 11) waren jeweils auf unterschiedliche Ausprägungen der Ertragsstrukturparameter Bestandesdichte, Kornzahl/Ähre und Tausendkorngewicht zurückzuführen. So erreichte Variante 9 auf flachgründigen Böden lediglich eine unterdurchschnittliche Bestandesdichte und auch ein unterdurchschnittliches Tausendkorngewicht, allerdings lag die Kornzahl/Ähre erheblich über dem Mittel (Tab. 6). Demgegenüber war für Variante 10 die Ausbildung aller Ertragsstrukturparameter auf flachgründigen Böden leicht überdurchschnittlich, während Variante 11 eine geringfügig unter dem Gruppenmittel liegende Kornzahl/Ähre durch eine hohe Bestandesdichte und ein überdurchschnittliches Tausendkorngewicht ausgleichen konnte (Tab. 6). Somit ließen sich die Ertragsvorteile der Varianten mit einer N-Düngung von 160 kg N/ha auf flachgründigen Böden nicht auf die Förderung eines Ertragsstrukturparameters zurückführen, vielmehr wird die hohe Kompensationsfähigkeit des Weizenbestandes bei der Ertragsbildung deutlich.

Die düngungsbedingte Abstufung bezüglich des Ertragsanstieges bei zunehmender nFK reichte von 13.1 dt/ha*

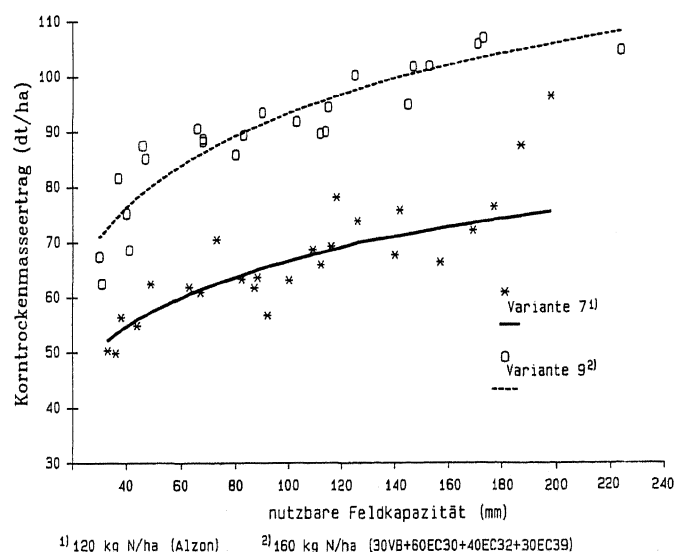


Abbildung 2: Gesamt-trockenmasseertrag von Winterweizen in Abhängigkeit von der nutzbaren Feldkapazität bei unterschiedlichen N-Düngungsvarianten

Figure 2: Total dry matter yield of winter wheat as affected by plant available water capacity for different N-fertilizer treatments

(ln mm nFK) (Var. 7) bis 18.6 dt/ha * (ln mm nFK) (Var. 9) (Tab. 7). Dabei waren mit zunehmendem N-Einsatz tendenziell stärkere Ertragszunahmen in Abhängigkeit von der nFK zu verzeichnen (Tab. 7). Lediglich für die mit Alzongedüngten Varianten (Var. 7; Var. 8) wurden – wie bereits bei den Startwerten – unterdurchschnittliche Werte der Ertragszunahmen errechnet (Tab. 7). Insgesamt folgte der Ertragsanstieg einer ähnlichen Abstufung wie der Ertrag bei niedriger nFK. So wurde für Variante 9 mit 18.6 dt/ha * (ln mm nFK) sowohl der höchste Ertragszuwachs bei zunehmender nFK als auch einer der höchsten Startwerte (69.3 dt/ha) errechnet. Demzufolge ließ sich mit den Düngermengen und -verteilungen, die auf Böden mit niedriger nFK einen hohen Ertrag erbrachten, auch das höhere Ertragspotential der tiefgründigen Böden ausschöpfen. Diesen Zusammenhang verdeutlicht Abbildung 2, aus der hervorgeht, daß die Regressionskurven unterschiedlicher Düngervarianten einen annähernd gleichen Verlauf aufweisen, allerdings ist das Niveau über den gesamten Bereich der untersuchten nutzbaren Feldkapazitäten deutlich verschoben.

4. Diskussion

Die Untersuchungen wurden in Trockenjahren durchgeführt. Dabei reagierte Winterweizen deutlich schwächer auf Variationen der nutzbaren Feldkapazität als Silomais. Dies war zu erwarten, da die ertragsbestimmenden Parameter bei der Winterung zum Teil bereits im Winterhalbjahr ausgebildet werden, einem Zeitraum, in dem stets genügend Feuchtigkeit vorhanden ist.

Die Ergebnisse zeigen, daß bei Silomais durch eine differenzierte, dem Bodenwasserspeichervermögen angepaßte Stickstoffdüngung das Ertragspotential des Standortes besser genutzt wird. So steigerte eine niedrige N-Düngung zur Saat oder eine verzögerte N-Düngung bei 15 cm Wuchshöhe auf flachgründigen Böden den Kolbenenertrag und damit letztendlich den Gesamttrockenmasseertrag zur Siloreife, da mit dieser Aufteilung der N-Düngung eine Förderung der Kolbenentwicklung bei gleichzeitig verhaltener Restpflanzenentwicklung erreicht wird. Dieser Effekt des Düngungszeitpunktes zeichnet sich auch in Untersuchungen von VALTA und MAIDL (1995) ab. Demgegenüber erwies sich eine hohe Andüngung zur Saat, die auf flachgründigen Böden die Jugendentwicklung zu sehr förderte (Tab. 4), bei knappem Wasserangebot als nachteilig für den Gesamttrockenmasseertrag zur Siloreife. Es ist daher zu ver-

muten, daß stark angedüngte Bestände bereits in frühen Stadien hohe Transpirationsraten erreichen und zudem der höhere Wasserverbrauch des üppigeren vegetativen Apparates den witterungsbedingten Trockenstreß auf flachgründigen Böden in der späteren Entwicklung zusätzlich verstärkt. Auf die möglicherweise ertragsmindernde Wirkung einer zu üppigen Jugendentwicklung weisen bereits HEPTING (1984) und ALDRICH et al. (1986) hin, wobei die vorliegenden Ergebnisse deutlich machen, daß Ertragsverluste bei unzureichender Wasserversorgung insbesondere auf einen geringen Kolbenenertrag zurückzuführen sind.

Auch bei Winterweizen wirkte sich eine verhaltene Stickstoffdüngung zu Vegetationsbeginn auf flachgründigen Böden günstig auf die Ertragshöhe aus. FISCHBECK et al. (1993) bestätigen, daß eine mäßige Startgabe von 40 kg N/ha in aller Regel ausreicht, um einen optimalen Verlauf der N-Aufnahme von Winterweizenbeständen zu gewährleisten. FREDERICK und CAMBERATO (1995) weisen zudem darauf hin, daß eine überzogene Startdüngung bei Sommertrockenheit häufig zu Ertragseinbußen führt, da zu hohe Startgaben überhöhte Bestandesdichten nach sich ziehen. Der damit verbundene unproduktive Wasserverbrauch kann insbesondere unter den Anbaubedingungen Süddeutschlands die Ausbildung der weiteren Ertragsstrukturparameter Kornzahl/Ähre sowie Tausendkorngewicht beeinträchtigen (FISCHBECK et al., 1993). Dies zeigt sich auch in den niedrigen Startwerten der hoch angedüngten Varianten 7 und 8 (Tab. 7), die auf unproduktiven Wasserverbrauch schließen lassen. Neben der Andüngung beeinflusst auch die gesamte N-Düngermenge, die bis Schoßbeginn verabreicht wird, die Bestandesdichte, da mit einer hohen N-Versorgung in diesem Entwicklungsabschnitt die Reduktion von Seitentrieben abgeschwächt wird (POMMER und FINK, 1992). Um auf leichten, sandigen Böden mit geringem N-Nachlieferungsvermögen eine optimale Bestandesdichte zu erreichen, empfehlen DIEPOLDER et al. (1992) deshalb bis Schoßbeginn eine N-Düngermenge von 80–90 kg N/ha. Dies bestätigen die hier vorgestellten Ergebnisse, bei denen sich für die Varianten, die bei einer Gesamt-N-Menge von 160 kg N/ha bis EC 30 mit 90 kg N/ha gedüngt wurden, die höchsten Startwerte der Regressionsgleichungen errechneten (Tab. 7).

Bei Silomais fällt unter dem Aspekt einer kleinräumig differenzierten N-Düngung auf, daß die auf flachgründigen Böden empfehlenswerte Düngungsstrategie mit fehlender bzw. geringer Andüngung auf den tiefgründigen Böden zu Ertragseinbußen führt. So war auf tiefgründigen Böden eine hohe N-Düngung zur Saat nötig, um das Ertragspotential

bei günstiger Wasserversorgung auszuschöpfen (Abb. 1). Diese Beobachtung steht im Gegensatz zu den Messungen von HEPTING (1984) sowie WALTHER und JÄGGELI (1989), die eine geringe Andüngung von ca. 30 kg N/ha zur Saat als ausreichend erachten und der zweiten Düngung im 6–8 Blatt-Stadium eine sehr viel größere Bedeutung beimessen. Nach BULLOCK et al. (1993) beschleunigt eine Andüngung zwar die Jugendentwicklung, dieser Entwicklungsvorsprung zieht jedoch eine frühere Abreife und damit eher einsetzende Substanzverluste nach sich, wodurch die ertragssteigernde Wirkung einer Startdüngung wieder ausgeglichen wird. Dieser ertragsmindernde Effekt konnte in der vorliegenden Untersuchung nicht bestätigt werden, was aufgrund des relativ späten Saattermines verständlich ist. Vielmehr lassen die hier vorgestellten Ergebnisse den Schluß zu, daß eine ausreichende vegetative Entwicklung, die durch eine hohe Andüngung gefördert wird, die Grundlage für einen hohen Gesamttrockenmasseertrag bei günstiger Wasserversorgung darstellt (MAIDL und FISCHBECK, 1989).

Anders als bei Silomais ergab sich bei Winterweizen kein Gegensatz zwischen den Düngungsempfehlungen für flach- und tiefgründige Böden (Abb. 2). Es ließ sich zeigen, daß Varianten, die hohe Startwerte erreichten, auch hohe Ertragszunahmen bei zunehmender nFK aufwiesen (Tab. 7; Abb. 2). Voraussetzung war eine mäßige N-Düngung zu Vegetationsbeginn mit einer ergänzenden N-Gabe zum Schoßbeginn. Gleichzeitig war über den gesamten Bereich der untersuchten nFK eine Gesamt-N-Menge von 160 kg N/ha nötig, um den Höchstertrag zu erreichen (Tab. 7). Nach DIEPOLDER et al. (1992) sind auf leichten Böden in Bayern deutlich höhere N-Mengen von 200–230 kg N/ha auszubringen, allerdings wurden in diesen Untersuchungen neben der Ertragsleistung auch die Proteingehalte im Korn bei der Ableitung der N-Düngungsempfehlung zugrundegelegt. Die Autoren weisen gleichzeitig darauf hin, daß dieser N-Einsatz zu N-Überbilanzen von + 20 bis + 55 kg N/ha führte. Ähnliche Größenordnungen der N-Überbilanz von + 60 kg N/ha wurden auch in der vorliegenden Untersuchung errechnet (LUDWIG, 1993).

Die aus den vorgestellten Ergebnissen auf flachgründigen Böden abgeleiteten Düngungsstrategien bei Mais und Winterweizen mit reduzierter oder verzögerter Andüngung tragen auch zu einer Verminderung des Nitrataustragsrisikos bei. So tritt nach Berechnungen von MAIDL et al. (1994) in Bayern auf den meisten landwirtschaftlich genutzten Standorten in den frühen Entwicklungsstadien von Mais und Winterweizen ein Sickerwasseranfall auf, so daß bei der gleichzeitig geringen N-Aufnahmekapazität der

Kulturpflanzen in diesem Zeitraum die Gefahr eines erhöhten Nitrataustrages besteht. Eine N-Düngung zur Saat bzw. zu Vegetationsbeginn erhöht das Nitrataustragsrisiko zusätzlich, wie Untersuchungen von KHANIF et al. (1984) zu Mais bzw. RETZER (1995) zu Winterweizen bestätigen. Durch eine verzögerte Andüngung bei Mais bzw. eine niedrige Startgabe bei Winterweizen läßt sich das Nitrataustragsrisiko in diesem frühen Entwicklungsabschnitt reduzieren (STICKSEL et al., 1994; RETZER, 1995). Es ist jedoch darauf hinzuweisen, daß bei Silomais die Anwendung dieser grundwasserschonenden Düngungsstrategie bei günstiger Wasserversorgung zu Ertragseinbußen führt (Abb. 1). Da zudem eine Spätsommertrockenheit wie im Versuchsjahr 1991 nach Auswertung 30jähriger Niederschlagsaufzeichnungen im Untersuchungsgebiet in weniger als 20 % der Fälle eintritt, ist der Verzicht auf eine Düngung zur Saat von Silomais als Schutzmaßnahme vor überhöhten Nitratreinträgen in das Grundwasser lediglich auf extrem flachgründigen Böden angezeigt.

Literatur

- ALDRICH, S. R., W. O. SCOTT and R. G. HOEFT (1986): Modern corn production. 3. Aufl., A & L Publications, Champaign, Illinois, 153.
- ANONYM (1985): Die Düngung von Acker- und Grünland nach Ergebnissen der Bodenuntersuchung. Gemeinsame Bearbeitung: Bayer. LBP München-Freising, Landwirtschaftliches Untersuchungsamt Veitshöchheim, Bayer. HVA für Landwirtschaft, Institut für Pflanzenernährung der TU München-Weihenstephan.
- BATCHELDER, A. R. and J. N. jr. JONES (1972): Soil management factors and growth of *zea mays* L. on topsoil and exposed subsoil. *Agron. J.*, 64, 648–652.
- BODENKUNDLICHE KARTIERANLEITUNG (1982): Kartieranleitung der AG Bodenkunde der Geologischen Landesämter und der Bundesanstalt für Bodenforschung. 3. Aufl. Schweizerbart, Hannover.
- BULLOCK, D. G., F. W. SIMMONS, I. M. CHUNG and G. I. JOHNSON (1993): Growth analysis of corn grown with or without starter fertilizer. *Crop Sci.*, 33, 112–117.
- CAMPELL, C. A., R. P. ZENTNER and P. J. JOHNSON (1988): Effect of crop rotation and fertilization on the quantitative relationship between spring wheat yield and moisture use in southwestern Saskatchewan. *Can. J. Soil Sci.*, 68, 1–16.
- DIEPOLDER, M., F.-X. MAIDL und G. FISCHBECK (1992):

- Standortgerechte Stickstoffdüngung zu Winterweizen – Versuchsergebnisse aus verschiedenen Regionen Bayerns. Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss., 5, 185–188.
- FISCHBECK, G., J. DENNERT und R. MÜLLER (1993): Untersuchungen zur Optimierung der N-Aufnahme von Winterweizenbeständen durch ergänzende Düngungsmaßnahmen. J. Agron. Crop Sci., 171, 82–95.
- FREDERICK, J. R. and J. J. CAMBERATO (1995): Water and nitrogen effects on winter wheat in the southeastern coastal plains: I. Grain yield and kernel traits. Agron. J., 87, 521–526.
- HÄCKEL, H. (1986): Das Klima. In: Bayer. Geolog. Landesamt (Hrsg.): Erläuterungen zur standortlichen Bodenkarte von Bayern-München, Augsburg und Umgebung. München, 81–91.
- HARTGE, K. H. und R. HORN (1989): Die physikalische Untersuchung von Böden. 2. Aufl. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- HEPTING, L. (1984): Stickstoff gezielt düngen – auch zu Silomais. Mais, 2, 16–20.
- IDE, G., G. HOFMAN, M. VAN RUYMBEEK and C. OSSEMERCT (1987): Influence of subsoiling on the yield of sugar beet. Z. Pfl.-ern. Bdk., 150, 151–155.
- KHANIF, Y. M., O. VAN CLEEMPUT and L. BAERT (1984): Field study of the fate of labelled fertilizer nitrate applied to barley and maize in sandy soils. Fert. Res., 5, 289–294.
- LUDWIG, A. (1993): Winterweizen. In: F. OTILLINGER, STADTWERKE AUGSBURG (Hrsg.): Stickstoffumsatz im Boden und Grundwasser bei unterschiedlicher Nutzung – Alternativen zur herkömmlichen Bewirtschaftung. BMFT-Verbundforschungsprojekt, 14–40.
- MAIDL, F.-X. und G. FISCHBECK (1989): Neue Wege einer gezielten Stickstoffdüngung zu Mais. VDLUFA-Schriftenreihe, 30, 143–148.
- MAIDL, F.-X., A. HEISSENHUBER, M. KÖBLER und H. BRUNNER (1994): Untersuchungen zur Begriffsbestimmung einer „ordnungsgemäßen Landbewirtschaftung“ im Sinne des Gewässerschutzes. Bayer. Landesamt für Wasserwirtschaft (Hrsg.), München.
- POMMER, G. und K. FINK (1992): Ausrichtung der zweiten Stickstoffgabe bei Winterweizen an der Entwicklung der Ährenanlagen in den Haupthalmen. Bayer. Landw. Jb., 69 (4), 447–451.
- RETZER, F. (1995): Untersuchungen zur Stickstoffverwertung von Weizenbeständen. Diss. TU München-Weihenstephan.
- RÖDER, R. und D. EDEN (1988): Einfluß der Änderung der Bodennutzungsintensität (verschiedene Bodennutzungsarten) auf Grund- und Sickerwasserbeschaffenheit. Texte Umweltbundesamt 17, Berlin.
- SAS INSTITUTE INC. (1985): SAS user's guide: Statistics. 5. Aufl., SAS Institute Inc., Cary, N. C. USA.
- SCHRÖDER, D. (1974): Beziehungen zwischen Kornertrag und Lößmächtigkeit bei Weizen und Hafer in einem Trockenjahr. Z. Acker- und Pflanzenbau, 138, 232–238.
- SCHROEDER, S. A. and G. A. HALVORSON (1988): Soil water depletion under crops on reclaimed and undisturbed soils. J. Environ. Qual., 17(1), 130–134.
- SHAFFER, M. J., T. E. SCHUMACHER and C. L. EGO (1993): Long-term effects of erosion and climate interactions on corn yield. J. Soil Water Conserv., 49(3), 272–275.
- SIPPEL, R., F.-X. MAIDL und G. FISCHBECK (1993): Grundaufnahme des derzeitigen Ertragspotentials des Versuchsstandortes Scheyern. In: Abschlußbericht Aufbau-phase 1990–1992, FAM-Bericht 3. R. HANTSCH und M. KAINZ (Hrsg.), GSF Neuherberg, 131–144.
- STICKSEL, E. und M. WOLF (1988): Ertragsbildung von Winterweizen und Wintergerste in Abhängigkeit von der Schluffdeckenmächtigkeit an erodierten Hängen. Teil I und II. Dipl. Arb. TU München-Weihenstephan.
- STICKSEL, E., F.-X. MAIDL und G. FISCHBECK (1994): Reduzierung des Nitrataustrags unter Silomais auf Böden hoher Nitrataustragsgefährdung durch angepaßte Düngungsstrategien. Agribiol. Res., 47, 324–334.
- STONE, J. R., J. W. GILLIAM, D. K. CASSEL, R. B. DANIELS, L. A. NELSON and H. J. KLEISS (1985): Effect of erosion and landscape position on the productivity of piedmont soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 49, 987–991.
- VALTA, R. und F.-X. MAIDL (1995): Untersuchungen zur verbesserten Gülleverwertung im Maisanbau. Beitr. 2. Koll. KTBL „Güllevermeidung und Gülleverwertung“. Darmstadt, 8.
- WALTHER, U. und F. JÄGGLI (1989): Pflanzen- und umweltgerechte Stickstoffdüngung des Mais. Mais, 2, 18–21.

Anschrift der Verfasser

Dr. Ewald Stickse, Dr. Franz-Xaver Maidl, Dipl. Ing. agr. Alexander Ludwig und em. Prof. Dr. Dr. h.c. Gerhard Fischbeck, Lehrstuhl für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung, TU München-Weihenstephan, D-85350 Freising.

Eingelangt am 4. Mai 1996

Angenommen am 21. Mai 1996