

Aufnahme und Verwertung von Stickstoff in Mais (*Zea mays*) auf Schwarzerde bei sehr hoher N-Düngung - ein Feldversuch

Horst SCHULZ

2 Abbildungen und 4 Tabellen

Abstract

SCHULZ, H.: Nitrogen uptake and utilization of maize (*Zea mays*) on black earth (*Haplic Chernozem*) by extremely high nitrogen inputs - a field study. - *Hercynia N. F. 54/2* (2021): 145 – 156.

This field study investigated the N uptake from inorganic fertilizer, e.g. calcium ammonium nitrate (CAN) in silage maize and effects of over-fertilization in the soil and in the plant metabolism. Ammonium and nitrate in soil, natural isotope ratios of total nitrogen in shoots as well as amino acids and macro nutrients were analysed. The results, which was obtained here in one growing season, can be summarized to the following statements: (I) In the case of exclusively mineral fertilisation of maize on sorptive black soil (Chernozem), the field crop apparently takes up more nitrogen from the mineralisation of organic matter for biomass formation than from the fertilizer supplied. (II) Over-fertilization of silage maize on black soil with ammonium and nitrate led to disturbances in the N metabolism of the plant with yield reductions. (II) To confirm the statements, multi-year studies with different maize varieties on various black earth and varying humus contents are necessary.

Key words: *Zea mays*, Schwarzerde, pflanzenverfügbare N, N-Aufnahme, Aminosäuren, Biomasse

1 Einleitung

Die landwirtschaftlichen Betriebe in Deutschland stehen mit der Düngeverordnung vom 26.05.2017 (DüV, § 3 (2); geändert am 27. April 2020) vor großen Herausforderungen. Die Betriebe müssen, um umweltschonend zu düngen, den Nährstoffbedarf der Pflanzen in Abhängigkeit vom betrieblichen Ertragsniveau ermitteln. Für die Feldfrucht Mais beträgt die insgesamt zulässige N-Zufuhr für einen Ertrag von 450 dt Frischmasse 200 kg Stickstoff. Bekannt ist, dass Mais, mehr als andere Fruchtarten, Stickstoff über den Bedarfswert aufnehmen kann ohne negative Veränderungen im Wachstum zu zeigen (KUHLMANN 2011). Daher kommt es vor, dass Maisflächen mit organischen Düngern wie Gülle häufig überdüngt werden. In solchen Fällen wird pflanzenverfügbare Stickstoff, insbesondere Nitrat, der nicht in Biomasse verwertet wurde, aus dem Boden ausgewaschen und in Oberflächengewässer eingetragen. Das trifft insbesondere für Böden mit geringen Humusgehalten bzw. Sorptionseigenschaften zu. Daher fordert der Gesetzgeber von den Landwirten die N-Zufuhr jeder Düngemaßnahme entsprechend des betriebsspezifischen Ertragsniveaus zu berechnen. Von Bedeutung sind jedoch nicht nur die Mengenbegrenzung in Bezug zum Ertrag, sondern auch die Düngerwirkung auf den Stoffwechsel in der

Pflanze und der Verbleib von zugeführtem Dünger-N im Boden, der nicht von der Pflanze zur Produktion von Biomasse genutzt wird. Wir wissen heute, dass im Vergleich zur organischen Düngung mit Gülle oder Biogärresten zu Silomais auch mit anorganischen Düngern, z. B. Kalkammonsalpeter (KAS) auf Parabraunerden hohe Erträge zu erzielen sind (WENDLAND et al. 2018). Dabei zeigte sich, dass bei N-Zufuhr ab 150 kg/ha zu Silomais der Ertrag an Biomasse stagniert. Allerdings sind diese Versuchsergebnisse nur bedingt auf andere Böden zu übertragen und die Ermittlung optimaler Dünger-N Zufuhren zu Silomais erfolgte mit der praxisüblichen Differenzmethode, bei der lediglich N-Gehalte berücksichtigt werden und somit nur eine „scheinbare“ Dünger-N Ausnutzung berechnet werden kann. Folglich erhebt sich die Frage (1) Wie hoch ist die N-Aufnahme aus anorganischen Düngern, zum Beispiel KAS in Silomais tatsächlich? und (2) Welche Auswirkung hat die N-Düngung im Boden und auf den Stoffwechsel von Pflanzen, wenn über einen angenommenen N-Bedarfswert von 150 kg/ha gedüngt wird?

Ziel dieser Arbeit war es daher, die Aufnahme und Verwertung von Stickstoff bei Mais auf sorptionsstarker Schwarzerde bei steigender N-Gabe über 100 kg N/ha bis extrem hoher N-Zufuhr von 1300 kg N/ha Kalkammonsalpeter zu prüfen. Im Einzelnen wurde hierbei die N-Aufnahme aus dem zugeführten Dünger unter Einbeziehung der N-Gehalte und der natürlichen N-Isotopenzusammensetzung im Spross von Silomais bestimmt. Zur Bewertung der N-Verwertung wurden in Maisblättern die Gehalte von zellulärem Ammonium und Nitrat sowie die Gehalte von N-Metaboliten (Amide) bestimmt und auch die Makronährstoffe N, P, K, Ca, Mg und S. Um Aussagen zur Verfügbarkeit von Dünger-N und seinen Verbleib im Boden zu untersuchen, wurden die Gehalte von Ammonium und Nitrat in verschiedenen Bodenhorizonten analysiert.

2 Material und Methoden

2.1 Feldversuch

Der Feldversuch wurde in einer einfaktoriellen Blockanlage mit 5 Wiederholungen auf dem Versuchsfeld in Bad Lauchstädt durchgeführt. Die Fläche der einzelnen Versuchspartellen betrug jeweils 6 x 10 m. Zur Aussaat am Ende der 4. Aprilwoche im Jahr 1996 kamen 14 Körner/m² der Maissorte „Boss“ in einem Reihenabstand von 75 cm. Die mineralische N-Düngung erfolgte mit Kalkammonsalpeter (50 % NH₄-N, 50 % NO₃-N) in 8 Düngerstufen (Tab. 1). In den Bodenhorizonten der insgesamt 40 Testflächen wurden in 0-30 cm Bodentiefe im Mittel pH-Werte (CaCl₂) von 7,5 gemessen und Gehalte von 0,16 % N_t, 1,804 % C_t sowie 0,03 % S_t bestimmt. Bei einem C/N-Verhältnis von 11,3 lag bei C_{org}-Gehalten zwischen 2,06 % (ALTERMANN et al. 2005) und 2,15 % (KÖRSCHENS (1996) lag der Humusgehalt durchschnittlich bei 3,6 %. Als Vorfrüchte wurden auf der Versuchsfläche 1994 Wintergerste und 1995 Winterweizen angebaut. Der N-Eintrag aus der Atmosphäre in den Boden betrug nach RUSSOW & WEIGEL (2000) 64 kg N/ha. Die N-Nachlieferung aus der Mineralisation organischer Bodensubstanz wurde nach Angaben von KÖRSCHENS (1996) mit 80 kg N/ha geschätzt. Im Vergleich zum langjährigen Mittel von Temperatur (8,7 °C) und Niederschlag (483,9 mm) betrug im Versuchsjahr 1996 das Temperaturmittel 7 °C bei einer Niederschlagssumme von 435 mm. Die Monatswerte von Temperatur und Niederschlag sind Abbildung 1 zu entnehmen.

Tab. 1 Düngermengen und Düngetermine von Kalkammonsalpeter (KAS).

Table 1 Fertilizer levels and application dates of calcium ammonium nitrate (CAN).

Düngerstufen (DST)	1. Düngung	2. Düngung	3. Düngung
Düngermenge	15. April 1996	5. Juni 1996	3. Juli 1996
(kg N/ha)	vor Aussaat	Wuchshöhe 15 cm	Wuchshöhe 30 cm
Kontrolle	0		
100	100		
300	300		
500	300	200	
700	300	400	
900	300	300	300
1100	400	400	300
1300	400	450	450

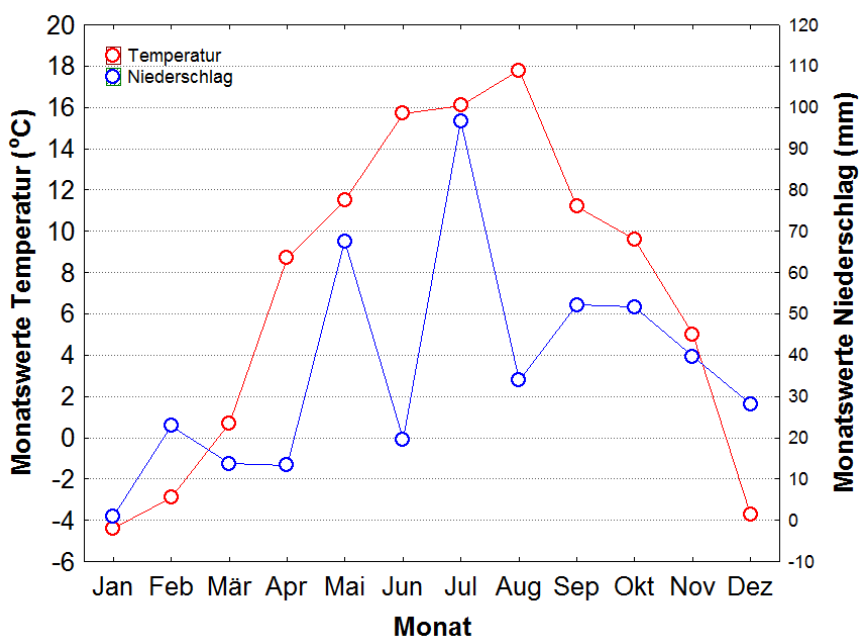


Abb. 1 Monatswerte von Temperatur und Niederschlag im Untersuchungsjahr 1996.

Fig. 1 Means of temperature and atmospheric precipitation in the investigation year 1996.

2.2 Entnahme von Pflanzen- und Bodenproben

Zur Vermeidung von Randeffekten erfolgten die Probenahmen in der Kernfläche von 1,5 x 9,8 m. Für die Analyse von Pflanzeninhaltsstoffen wurden Mischproben vom 4. Laubblatt vor Rispe von jeweils 25 Pflanzen im Milchreifestadium (2. Augustwoche 1996) entnommen. Gleichzeitig wurden die mittleren Pflanzenhöhen in Zentimeter (cm) gemessen und Bodenmischproben in 0-30, 31-60 und 61-90 cm Bodentiefe mit einem Bohrstock entnommen. Die Vollernte der oberirdischen Biomasse (dt TM/ha) je Parzelle und Düngerstufe erfolgte getrennt nach Spross (Blatt+Stiel) und Kolben in der ersten Oktoberwoche 1996.

2.3 Analytik

Für die Aufarbeitung der Mischproben vom 4. Laubblatt wurde ein Teil der geernteten Biomasse entsprechend der verschiedenen durchzuführenden chemischen und biochemischen Analysen entweder bei 60 °C im Labor getrocknet, z. B. für die Analyse von Gesamtstickstoff (N_t) und natürlichen Isotopenverhältnissen ($^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ bzw. $\delta^{15}\text{N}$) sowie Gesamtgehalte von Phosphor (P_t), Kalium (K_t), Calcium (Ca_t), Magnesium (Mg_t) und Schwefel (S_t) oder das verbleibende Probenfrischmaterial wurde für die Analyse von Ammonium und Nitrat sowie der Aminosäuren Glutamin (Gln), Asparagin (Asn) und Arginin (Arg) vor Ort sofort in Flüssig-Stickstoff eingefroren. Die Bestimmung von N_t und Protein-N (PROTN) erfolgte nach HUHNS & SCHULZ (1996) und von $\delta^{15}\text{N}$ mit dem Elementaranalysator gekoppelt mit einem Massenspektrometer (GEHRE 1994). Für die Bestimmung von P_t , K_t , Ca_t , Mg_t und S_t wurde die Röntgenfluoreszenz eingesetzt (SCHULZ et al. 1999). Zur Analyse der Chloropyll *a*-Gehalte im 4. Laubblatt wurde Frischmaterialpulver mit Aceton extrahiert und spektralphotometrisch nach LICHTENTHALER & WELLBURN (1983) bestimmt.

Die Bodenproben wurden für die chemische Analyse auf 2 mm gesiebt und gefriergetrocknet. Pflanzenverfügbares Nitrat im Boden wurde im H_2O -Extrakt (0,5 g TM/25 ml) ionenchromatographisch und Ammonium im 1 % K_2SO_4 -Extrakt (6,25 g TM/25 ml) mit der gassensitiven NH_3 -Elektrode analysiert (SCHULZ et al. 2012). Die Analyse von Ammonium und Nitrat im 4. Laubblatt erfolgte nach Aufarbeitung des eingefrorenen Frischmaterials wie oben beschrieben, die Aminosäureanalyse mit der Hochleistungs-Flüssig-Chromatographie (HPLC) nach HUHNS & SCHULZ (1996).

2.4 Berechnung der Düngeraufnahme

Die Aufnahme von Gesamt- NH_4NO_3 (Dünger- N_t) im 4. Laubblatt (FBL), Spross bzw. Blatt+Stiel (BST) und Kolben (KOL) erfolgte nach der Formel von ERIKSEN (1996):

$$\text{a. Dünger-}N_t \text{ FBL (mg } N_t/\text{g TM)} = ((\delta^{15}N_t \text{ FBL gedüngt} - \delta^{15}N_t \text{ FBL Kontrolle}) / (\delta^{15}N_t \text{ Dünger} - \delta^{15}N_t \text{ FBL Kontrolle})) * \text{mg } N_t \text{ FBL/g TM}$$

$$\delta^{15}N_t \text{ FBL Kontrolle} = 2,49; \delta^{15}N_t \text{ Dünger} = - 4,49$$

$$\text{b. Dünger } N_t \text{ BST (mg } N_t/\text{g TM)} = ((\delta^{15}N_t \text{ BST gedüngt} - \delta^{15}N_t \text{ BST Kontrolle}) / (\delta^{15}N_t \text{ Dünger} - \delta^{15}N_t \text{ BST Kontrolle})) * \text{mg } N_t \text{ BST/g TM}$$

$$\delta^{15}\text{N}_{\text{t BST Kontrolle}} = 2,77; \delta^{15}\text{N}_{\text{t Dünger}} = - 4,49$$

$$\text{c. Dünger } \text{N}_{\text{t KOL}} \text{ (mg N/g}^1 \text{ TM)} = ((\delta^{15}\text{N}_{\text{t KOL gedüngt}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{t KOL Kontrolle}}) / (\delta^{15}\text{N}_{\text{t Dünger}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{t KOL Kontrolle}}))$$

$$* \text{ mg N}_{\text{t KOL/g TM}}$$

$$\delta^{15}\text{N}_{\text{t KOL Kontrolle}} = 2,40; \delta^{15}\text{N}_{\text{t Dünger}} = - 4,49$$

Die N-Gehalte (mg N/g TM) von Ammonium und Nitrat im Boden sowie verschiedener N-haltiger Inhaltsstoffe in der Biomasse wurden unter Verwendung der Gesamt-Trockenmassen (Vollernte) in kg N/ha umgerechnet. Zur Umrechnung von mg N/g TM Schwarzerde in dt N/ha über alle Bodenhorizonte (0-90 cm) wurde von einer durchschnittlichen Trockenrohdichte (TRD) von 1,43 t pro m³ ausgegangen (KUKA 2005).

2.5 Statistik

Die Prüfung auf signifikante Unterschiede zwischen den Düngerstufen erfolgte paarweise mittels parameterfreien Mann-Whitney U-Test (Statistica, Vers. 8.0, StatSoft, Hamburg).

3 Ergebnisse

3.1 N-Aufnahme und N-Verwertung

Die Ergebnisse zur Aufnahme von Gesamt-N (N_t) sowie die Gehalte von zellulärem Ammonium, Nitrat, Glutamin (Gln), Asparagin (Asn), Arginin (Arg) und Rohprotein (ProtN) im 4. Laubblatt sind in Abb. 2 graphisch dargestellt. Mit der applizierten Düngermenge stieg die Aufnahme von Dünger-N im Blatt bis 900 kg N/ha stetig an. Gleichzeitig erhöhten sich die Gehalte von zellulärem NH₄N und NO₃N sowie von Asparagin und Arginin, aber weniger von Glutamin bis zur Düngerstufe 500 kg N/ha. Für Asparagin wurden im Vergleich zur Kontrolle maximal 10-fache höhere N-Werte gemessen. Im Gegensatz dazu lagen die Arg-Gehalte zusammen mit Ammonium und Rohprotein schon in der Kontrolle auf hohem Niveau.

3.3 Nährstoffgehalte

Die in Tabelle 2 zusammengestellten Gehalte der Makronährstoffe im 4. Laubblatt von Stickstoff, Schwefel, Phosphor, Kalium, Calcium und Magnesium lagen nach JONES & ECK (1973) im Bereich einer optimalen Nährstoffversorgung. Mit Ausnahme von Stickstoff veränderten sich die Gehalte aller anderen Nährelemente mit ansteigender Düngerstufe kaum. Ausgenommen Calcium, das aufgrund seiner Anwesenheit im Kalkammonsalpeter ab 900 kg N/ha signifikant höhere Werte aufwies. Erwartungsgemäß stiegen mit zunehmendem N-Blattspiegel auch die Chlorophyll *a*-Gehalte zunächst an, verringerten sich aber wieder entsprechend abnehmender N-Gehalte in den Düngerstufen 1100 und 1300 kg N/ha.

Tab. 2 Nährlement- und Chlorophyll *a*-Gehalte (Mittelwerte \pm SD) im 4. Laubblatt von Mais (*Zea mays*) bei unterschiedlich hohen Düngergaben von Kalkammonsalpeter. Unterschiedlich kleine Buchstaben (a, b) stehen für signifikante Unterschiede zwischen den Düngerstufen (Mann-Whitney U-Test (paarweise), $n=5$, $p=0,05$).

Table 2 Nutrient element and chlorophyll *a* contents (means \pm SD) in the 4th leaf of maize (*Zea mays*) under varying fertilizer levels of calcium ammonium nitrate. Different lower case letters (a, b) represent statistically significant differences between the fertilizer levels (Mann-Whitney U-Test (pairwise), $n=5$, $p=0.05$).

Düngerstufe (kg N/ha)	Stickstoff	Schwefel	Phosphor	Kalium (mg g^{-1} TM)	Calcium	Magnesium	Chlorophyll <i>a</i>
0	27,51 \pm 1,4 (a)	2,76 \pm 0,2 (a)	3,14 \pm 0,11 (a)	15,50 \pm 0,7 (a)	9,22 \pm 0,4 (a)	3,36 \pm 0,1 (a)	4,74 \pm 0,21 (a)
100	31,31 \pm 0,9 (b)	2,83 \pm 0,1 (a)	3,23 \pm 0,07 (a)	15,02 \pm 0,6 (a)	8,72 \pm 0,2 (b)	3,34 \pm 0,2 (a)	5,28 \pm 0,31 (b)
300	32,24 \pm 1,0 (b)	3,08 \pm 0,1 (a)	3,34 \pm 0,09 (a)	14,06 \pm 0,4 (a)	9,32 \pm 0,3 (a)	3,53 \pm 0,1 (a)	5,75 \pm 0,36 (b)
500	31,39 \pm 0,1 (b)	3,06 \pm 0,2 (a)	3,34 \pm 0,04 (a)	15,23 \pm 0,5 (a)	9,38 \pm 0,2 (a)	3,28 \pm 0,1 (a)	5,00 \pm 0,37 (a)
700	32,15 \pm 0,7 (b)						
900	33,64 \pm 1,6 (b)	2,87 \pm 0,1 (a)	3,06 \pm 0,04 (a)	13,38 \pm 0,5 (a)	10,56 \pm 0,2 (b)	3,55 \pm 0,2 (a)	5,50 \pm 0,41 (b)
1100	31,39 \pm 0,6 (b)	2,75 \pm 0,2 (a)					
1300	31,04 \pm 0,3 (b)	2,57 \pm 0,1 (a)	2,96 \pm 0,05 (a)	13,07 \pm 0,5 (a)	10,24 \pm 0,6 (b)	3,12 \pm 0,2 (a)	4,89 \pm 0,21 (b)

3.4 N-Fractionen im Boden

In Tabelle 3 sind die Gehalte von pflanzenverfügbarem Stickstoff in Form von Ammonium und Nitrat in verschiedenen Horizonten bis zur Bodentiefe von 90 cm zusammengestellt. Überraschend ist, dass im Gegensatz zu Ammonium, Nitrat in allen Bodenhorizonten sowohl in der Kontrollvariante als auch bei Düngerstufe 100 kg N/ha nicht nachzuweisen war (Tab. 3). Wahrscheinlich lagen die Nitrat-Gehalte im H₂O-Extrakt unter 1 mg/l und wurden so ionenchromatographisch nicht erfasst. Erst ab Düngerstufe 300 kg N/ha war Nitrat bis 60 cm Bodentiefe nachweisbar und stieg mit Erhöhung der Düngerstufe in allen Bodenhorizonten deutlich an. Dabei lagen die NO₃N-Gesamtgehalte über den Mengen, die mit dem Dünger zugeführt wurden. Bei der höchsten Düngerstufe betrug der NO₃N-Gesamtgehalt 1294 kg N/ha. Das entsprach annähernd der Gesamtmenge an applizierten Dünger-N. Anders verhielt sich Ammonium im Boden. Bis zur Düngerstufe 100 kg N/ha unterschieden sich die N-Gehalte an pflanzenverfügbarem Ammonium nicht von den NH₄N-Gehalten in der Kontrollparzelle. In beiden Düngerstufen wurden noch bis zu 40 kg N/ha vorgefunden. Erst ab Düngerstufe 300 kg N/ha nahmen die pflanzenverfügbaren Gehalte an NH₄N deutlich zu, aber lagen mit maximal 19% bei Düngerstufe 1300 kg N/ha immer noch weit unter den Mengen, die mit dem Dünger zugeführt wurden (Tab. 3). Offensichtlich wurde der größte Teil an zugeführten NH₄N mikrobiell zu NO₃N umgesetzt wie auch durch die vorgefundenen NO₃N-Gesamtgehalte in den Bodenhorizonten nachgewiesen werden konnte.

Tab. 3 Gehalte (Mittelwerte \pm SD) verschiedener pflanzenverfügbarer N-Fractionen (N_{\min}) im Boden (0-90 cm) bei unterschiedlich hohen Düngergaben von Kalkammonsalpeter. Unterschiedlich kleine Buchstaben (a, b) stehen für signifikante Unterschiede zwischen den Düngerstufen (Mann-Whitney U-Test (paarweise), $n=5$, $p=0,05$).

Table 3 Contents (means \pm SD) of various plant available N fractions (N_{min}) in soil (0-90 cm) under varying fertilizer levels of calcium ammonium nitrate. Different lower case letters (a, b) represent significant differences between the fertilizer levels (Mann-Whitney U-Test (pairwise), $n=5$, $p=0.05$).

Düngerstufe (kg N/ha)	Pflanzenverfügbare Stickstoff (N_{min}) in den Bodenhorizonten (kg N/ha)					
	Ammonium			Nitrat		
	0-30 cm (kg N/ha)	31-60 cm (kg N/ha)	61-90 cm (kg N/ha)	0-30 cm (kg N/ha)	31-60 cm (kg N/ha)	61-90 cm (kg N/ha)
0	24 \pm 8 (a)	8 \pm 1 (a)	7 \pm 1 (a)	n.n.	n.n.	n.n.
100	25 \pm 9 (a)	8 \pm 7 (a)	7 \pm 1 (a)	n.n.	n.n.	n.n.
300	26 \pm 7 (a)	12 \pm 1 (b)	16 \pm 3 (b)	128 \pm 42 (a)	41 \pm 3 (a)	n.n.
500	40 \pm 9 (b)	25 \pm 2 (b)	19 \pm 3 (b)	365 \pm 47 (b)	64 \pm 9 (b)	20 \pm 9 (a)
700	43 \pm 6 (b)	18 \pm 1 (b)	17 \pm 2 (b)	589 \pm 40 (b)	72 \pm 10 (b)	17 \pm 4 (a)
900	41 \pm 7 (b)	26 \pm 4 (a)	15 \pm 2 (b)	721 \pm 50 (b)	106 \pm 12 (b)	8 \pm 1 (b)
1100	95 \pm 8 (b)	28 \pm 3 (a)	23 \pm 2 (b)	742 \pm 40 (b)	136 \pm 11 (b)	26 \pm 5 (a)
1300	120 \pm 15 (b)	34 \pm 5 (b)	21 \pm 12 (b)	1079 \pm 106 (b)	184 \pm 16 (b)	31 \pm 8 (b)

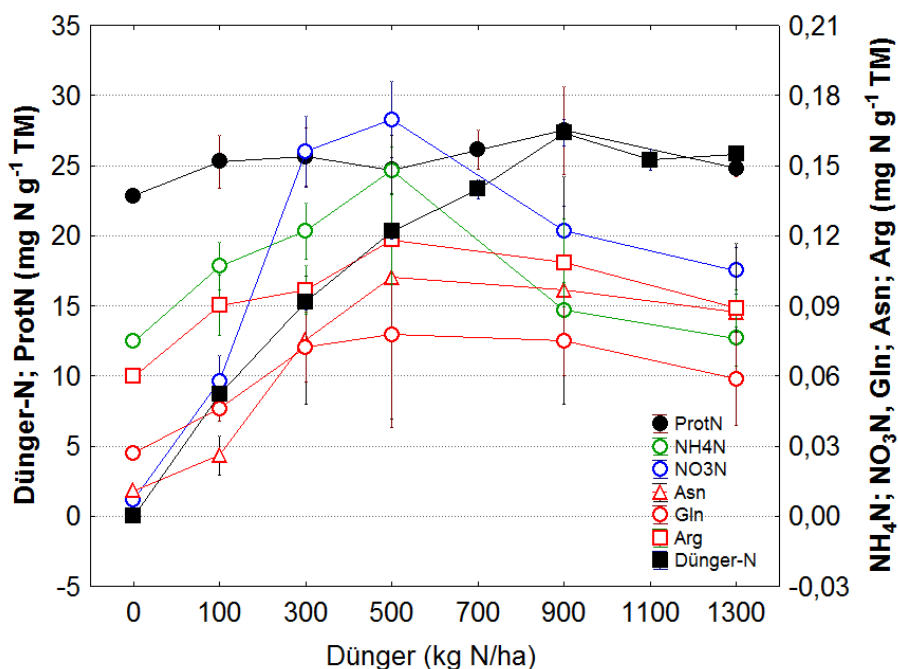


Abb. 2 Aufnahme von Dünger-N und N-Gehalte (Mittelwerte \pm Standardabweichung) von zellulärem Ammonium (NH_4N), Nitrat (NO_3N), Asparagin (Asn), Arginin (Arg) und Rohprotein (ProtN) im 4. Laubblatt von Silomais.

Fig. 2 Uptake of fertilizer N and nitrogen contents (means \pm SE) of cellular ammonium (NH_4N), nitrate (NO_3N), asparagine (Asn), arginine (Arg) and raw protein (ProtN) in 4th leaf of maize.

3.5 N-Entzug und Biomasse-Ertrag

Der Entzug von pflanzenverfügbarem Stickstoff (N_{\min}) im Boden durch Silomais sowie die Anteile von Dünger-N im Spross, getrennt nach Blatt+Stiel und Kolben einschließlich der Ertrag an Biomasse sind in Tabelle 4 zusammengestellt. Wie aus den N_t -Gehalten in der Gesamtpflanze zu entnehmen ist, wurden in der Kontrollparzelle und Düngerstufe (DST) 100 kg N/ha zwischen 140 bis 150 kg N/ha dem Boden entzogen. Das entspricht annähernd der N-Menge, die dem Mais im Boden aus dem atmosphärischen N-Eintrag und der N-Mineralisation zur Verfügung stand. Ab DST 300 kg N/ha stagnierten die N_t -Gehalte in der Pflanze, entsprechend stiegen die N_{\min} -Gehalte im Boden an. Ab DST 700 kg N/ha wurde bis 90 cm Bodentiefe insgesamt mehr N_{\min} gefunden als über den Dünger zugeführt wurde. Im Gegensatz dazu verringerten sich die N_t -Gehalte in der Gesamtpflanze. Der Anteil von Dünger-N in der Gesamtpflanze betrug bei DST 100 kg N/ha bezogen auf N_t nur 9,9 %. Erst mit zunehmender Düngerstufe erhöhte sich der Anteil von Dünger-N in der Gesamtpflanze (Blatt+Stiel+Kolben) auf maximal 73,3 %, wobei der Anteil von Dünger-N im Kolben immer höher war als in Blatt+Stiel (Tab. 4). Wuchshöhe und Ertrag an Biomasse nahmen aber kontinuierlich ab mit steigender N-Zufuhr trotz zunächst bis DST 700 kg N/ha erhöhten N_t -Gehalten in der Gesamtpflanze.

Tab. 4 Entzug von pflanzenverfügbarem Stickstoff (N_{\min}) im Boden (0-90 cm) und TM-Ertrag von Mais (Mittelwerte \pm SD) bei unterschiedlich hohen Düngergaben von Kalkammonsalpeter. Unterschiedlich kleine Buchstaben (a, b) stehen für signifikante Unterschiede zwischen den Düngerstufen (Mann-Whitney U-Test (paarweise), $n=5$, $p=0,05$).

Table 4 Removal of plant available nitrogen (N_{\min}) in soil (0-90cm), and yield of dry matter of maize (means \pm SD) under varying fertilizer levels of calcium ammonium nitrate. Different lower case letters (a, b) represent significant differences between the fertilizer levels (Mann-Whitney U-Test (pairwise), $n=5$, $p=0.05$).

Düngerstufe (kg N/ha)	N_{\min}	N_t	Dünger-N Anteil		Pflanzenhöhe (cm)	Biomasse (dt TM/ha)
	0-90 cm (kg N/ha)	Gesamtpflanze (kg N/ha)	Blatt+Stiel (kg N/ha)	Kolben (kg N/ha)		
0	39 \pm 8 (a)	139 \pm 11 (a)	0	0	2,00 \pm 0,10 (a)	132,40 \pm 6 (a)
100	40 \pm 9 (a)	152 \pm 11 (b)	3 \pm 1	12 \pm 2	2,04 \pm 0,08 (a)	127,13 \pm 6 (a)
300	223 \pm 42 (b)	160 \pm 13 (b)	14 \pm 1	51 \pm 5	1,99 \pm 0,12 (a)	120,90 \pm 7 (b)
500	503 \pm 51 (b)	168 \pm 12 (b)	21 \pm 3	77 \pm 7	1,96 \pm 0,16 (a)	125,27 \pm 3 (b)
700	756 \pm 64 (b)	152 \pm 11 (b)	26 \pm 2	74 \pm 7	1,85 \pm 0,05 (b)	111,83 \pm 2 (b)
900	917 \pm 81 (b)	135 \pm 14 (a)	26 \pm 2	72 \pm 7	1,82 \pm 0,12 (b)	100,13 \pm 13 (b)
1100	1050 \pm 112 (b)	135 \pm 12 (a)	29 \pm 2	65 \pm 7	1,81 \pm 0,05 (b)	99,96 \pm 12 (b)
1300	1469 \pm 143 (b)	116 \pm 11 (b)	25 \pm 2	60 \pm 6	1,76 \pm 0,05 (b)	85,40 \pm 13 (b)

4 Diskussion

Die Untersuchungen zur Aufnahme und Verwertung von Stickstoff in Mais (*Zea mays*) auf Schwarzerde lassen vermuten, dass der N-Entzug bei Maisanbau auf humusreicher Schwarzerde bei rein mineralischer Düngung mit Ammonium und Nitrat unter 150 kg N/ha liegt, wobei nur wenig Dünger-N

von Silomais zur Produktion von Biomasse genutzt wird, wenn im Boden ausreichend pflanzenverfügbare Stickstoff aus der Mineralisation organischer Substanz und aus atmosphärischen Stoffeintrag zur Verfügung steht (Tab. 4). Auch scheint der hier erzielte Ertrag an Biomasse viel zu niedrig und kann auch nicht allein darauf zurückgeführt werden, dass die Saat tiefer als üblich in den Boden gelegt wurde (pers. Mitt. A. Pfefferkorn) oder der Feldversuch in einem klimatisch untypischen Versuchsjahr durchgeführt wurde. Aber die Lufttemperaturen der ersten zwei Dekaden nach der Aussaat im Mittel mit 5,9 °C bei einer Niederschlagssumme von nur 8,5 mm im April (Daten nicht gezeigt) waren schon außergewöhnlich kalt und trocken, wodurch der Aufgang der Saat auch erst spät nach 30 Tagen erfolgte. Die Ursachen dafür lassen sich aber nicht mehr eindeutig aufklären. Plausibel erscheint, dass die nachgewiesenen Ertragsdepressionen auf N-Überschuss und Nährstoff-Ungleichgewichte zurückzuführen sind, wie auch PFEFFERKORN (1990) bei Anbau von Silomais auf einer extrem mit Stalldung und Gülle belasteten Fläche auf dem Versuchsfeld in Bad Lauchstädt zeigen konnte. Vergleichbar mit den hier vorgestellten Ergebnissen lagen bei C_r -Gehalte im Boden von 1,94 % die TM-Erträge bei 152,1 dt/ha und die Wuchshöhen bei maximal 231 cm (PFEFFERKORN 1990). Auch NITSCHKE (1996) konnte auf mit Gülle gedüngter Löß-Schwarzerde nach N-Mineralergänzungsdüngung von 0,4 dt N/ha bei Silomais keinen zusätzlichen Effekt auf den Ertrag an Biomasse feststellen. Scheinbar nutzt Mais auf humusreicher Schwarzerde bevorzugt N_{min} , der durch N-Nachlieferung aus der Mineralisation organischer Substanz verfügbar ist oder insbesondere organischen Dünger (OAD et al. 2004), während zugeführter mineralischer Dünger bei überhöhter Zufuhr nahezu ungenutzt im Boden zurück bleibt, entweder in Form von NH_4N fest und für die Pflanze unverfügbar an Tonmineralien gebunden wie vermutlich bei DST mit 100 kg N/ha geschehen oder annähernd zu 100 % mikrobiell zu NO_3N umgesetzt. Wahrscheinlich wurde durch Zufuhr von mineralischem Dünger-N auch verstärkt die Mineralisation organischer Substanz angeregt (FRANKO 1989). Einen Hinweis geben darauf zumindest die ab DST 700 kg N/ha überhöhten N_{min} -Gehalte im Boden (Tab. 4). Aber mehr stellt sich hier die Frage, wie die bereits ab DST 100 kg/ha eingetretenen Ertragsdepressionen zu erklären sind. Vermutlich war bereits zu Beginn der Vegetationsperiode im Boden der Kontrollparzelle mehr Ammonium als Nitrat pflanzenverfügbar. MÖCKER (2000) konnte in Gefäßversuchen unter Einsatz der ^{15}N -Tracertechnik nachweisen, dass bei Mais die Aufnahme von Nitrat in Anwesenheit von Ammonium signifikant verringert ist. Die Folge ist, dass sich selbst bei der an sich gegenüber N-Belastung toleranten C_4 -Pflanze im Blatt Ammonium akkumuliert (SCHROTMAYER et al. 1997). Wie in Abb. 2 gezeigt, wurden im 4. Laubblatt auf der Kontrollparzelle hohe NH_4N -Gehalte gefunden bei gleichzeitiger Akkumulation von Arginin. Dieser Befund verweist auf Störungen im N-Stoffwechsel der Pflanze, wenn von der Pflanze neben Nitrat auch Ammonium aufgenommen wird, das nicht zur Synthese von Protein-N (ProtN) genutzt wird. Arginin kann aufgrund seines engen C/N-Verhältnisses effizienter als Glutamin und Asparagin nicht in Protein umgesetzten Ammonium-N speichern bzw. entgiften (EDFAST et al. 1990). Andererseits ist bekannt, dass Asparagin die Aufnahme von NO_3N zu Gunsten von NH_4N hemmt (PALOVE-BELANG & MISTRİK 2002). Daher stagnierte die N-Aufnahme ab 900 kg/ha und die ProtN-Blattspiegel verblieben bei sich wieder verringernenden Amid-Gehalten auf einem konstanten Niveau (Abb. 2). Entsprechend erhöhten sich auch die Chlorophylla-Gehalte nicht mehr bzw. verringerten sich wieder bei der höchsten Düngerstufe (Tab. 2). Infolge wurden ab Mitte Juli und schon ab Düngerstufe 500 kg N/ha beginnend, Vergilbungen an den unteren Maisblättern bis zum Absterben der Organe beobachtet. Nicht weniger interessant erscheint auch der Einfluss der mineralischen Düngung auf die S-Ernährung im 4. Laubblatt (Tab. 2). Mais kann Mineral-N nur optimal aufnehmen und effizient verwerten, wenn die Pflanzen optimal mit Schwefel ernährt sind (SUTAR et al.

2017). Ein Indikator dafür ist das molare S/N-Verhältnis (MALCOLM & GARFORTH 1977). Entsprechend der Gehalte von Schwefel und Stickstoff im 4. Laubblatt (Tab. 2) lag das molare S/N-Verhältnis in den Kontrollparzellen im Mittel bei $0,044 \pm 0,001$, verringert sich dann aber stetig mit zunehmender mineralischer Düngung bis auf $0,036 \pm 0,001$ bei höchster Düngerstufe. Denkbar wäre, dass die Verringerung der molaren S/N-Verhältnisse bei hoher N-Aufnahme auf eine unzureichende SO_4S -Versorgung zurückzuführen ist. Das kann vorerst aber nicht bewiesen werden. Dafür sind weitere Untersuchungen bei variierender N- und S-Versorgung im Boden erforderlich.

5 Zusammenfassung

SCHULZ, H.: Aufnahme und Verwertung von Stickstoff in Mais (*Zea mays*) auf Schwarzerde bei sehr hoher N-Düngung – ein Feldversuch. - *Hercynia N. F.* 54/2 (2021): 145 – 156.

Die Feldstudie untersucht die Aufnahme von Stickstoff bei Mais auf sorptionsstarker Schwarzerde bei steigender N-Gabe über 100 kg N/ha bis extrem hoher N-Zufuhr von 1300 kg N/ha Kalkammonsalpeter sowie deren Auswirkungen im Boden und auf den N-Stoffwechsel in der Pflanze. Im Einzelnen wurde hierbei die N-Aufnahme aus dem zugeführten Dünger unter Einbeziehung der N-Gehalte und der natürlichen N-Isotopenzusammensetzung im Spross von Silomais bestimmt. Zur Bewertung der N-Verwertung wurden in Maisblättern die Gehalte von zellulärem Ammonium und Nitrat sowie die Gehalte von N-Metaboliten (Amide) bestimmt und auch die Makronährstoffe N, P, K, Ca, Mg und S. Die hier in einer Vegetationsperiode durchgeführten Untersuchungen lassen sich zu folgenden Aussagen zusammenfassen: (1) Bei ausschließlich mineralischer Düngung von Mais auf sorptionsstarker Schwarzerde nimmt die Feldfrucht zur Produktion von Biomasse scheinbar mehr Stickstoff aus der Mineralisation organischer Substanz auf als aus dem zugeführten Dünger. (2) Überhöhte Düngung von Ammonium und Nitrat zu Silomais auf Schwarzerde führte zu Störungen im N-Stoffwechsel der Pflanze mit Ertragsdepressionen. (3) Zur Validierung der Aussagen sind mehrjährige Untersuchungen mit unterschiedlichen Maissorten auf verschiedenen Schwarzerden und variierenden Humusgehalten erforderlich.

6 Danksagung

Für die Leitung des Feldversuches und Unterstützung bei der Vollernte und Aufarbeitung sei Herrn Dr. A. Pfefferkorn und Mitarbeitern sowie Frau Dr. Merbach von der Versuchsstation in Bad Lauchstädt, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH - UFZ gedankt. Dank gilt auch Herrn Dr. M. Gehre für die Durchführung der ^{15}N -Analytik (Department Analytik, UFZ) sowie Frau S. Härtling und R. Rudloff für die exzellente Assistenz bei den Laborarbeiten (Department Bodenökologie, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung - UFZ).

7 Literatur

- ALTERMANN, M., RINKLEBE, J., MERBACH, I., KÖRSCHENS, K., LANGER, U., HOFMAN, B. (2005): Chernozem - Soil of the Year. - J. Plant Nutr. Soil. Sci. 168: 725 – 740.
- EDFAST, A. B., NÄSHOLM, T., ERICSON, A. (1990): Free amino acids concentrations in needles of Norway and Scots pine trees on different sites in areas with two levels of nitrogen deposition. - Can. J. of Forest Res. 20: 1132 – 1136.
- ERIKSEN, J. (1996): Incorporation of S into soil organic matter in the field as determined by the natural abundance of stable S isotopes. - Biology Fertility Soils 22: 149 – 155.
- FRANKO, U. (1989): C- und N-Dynamik beim Umsatz organischen Substanz im Boden. - Diss. B., Akademie d. Landwirtschaftswiss. Berlin.
- GEHRE, M., HOFMANN, D., WEIGEL, P. (1994): Methodische Untersuchungen zum ¹⁵N-ConFlo-IRMS System. - Isotopenpraxis Isotopes Environ. - Health Stud. 30: 239 – 245.
- HUHN, G., SCHULZ, H. (1996): Contents of free amino acids in Scots pine needles from field sites with different levels of nitrogen deposition. - New Phytol. 134: 95 – 101.
- JONES, J. B., ECK, H.V. (1973): Plant analysis as an aid in fertilising corn and grain sorghum. - In: WALSH, L. M., BEATON, J. D. (eds.): Soil testing and plant analysis. - Soil Science Society of Amerika. - Madison, Wisconsin.
- KÖRSCHENS, M. (1996): Der natürliche Humusbedarf in Abhängigkeit vom Standort. - Bernburger Agrarber. 3: 1 – 11.
- KUHLMANN, N. (2011): Hinweise zur umweltgerechten Düngung von Körner-, Silo- und Energiemais. - Landesanstalt f. Landwirtschaft, Forsten u. Gartenbau Sachsen-Anh., Bernburg.
- KUKA, K. (2005): Modellierung des Kohlenstoffhaushaltes in Ackerböden auf der Grundlage bodenstrukturabhängiger Umsatzprozesse. - Diss., Univ. Halle-Wittenberg.
- LICHTENTHALER, H. K., WELLBURN, A. R. (1983): Determination of total carotenoids and chlorophyll a and b of leaf extracts in different solvents. - Biochem. Soc. Trans. 603: 591 – 592.
- MALCOLM, D. C., GARFORTH, M. F. (1977): The sulphur:nitrogen ratio of conifer foliage in relation to atmospheric pollution with sulphur dioxide. - Plant and Soil. 47: 89 – 102.
- MÖCKER, D. (2000): Vergleichende Untersuchungen zur Wirkung von atmosphärischen Schadstoffen auf den Stickstoffwechsel in *Triticum aestivum* (C₃-Pflanze) und *Zea mays* (C₄-Pflanze). - Diss., Univ. Halle-Wittenberg.
- NITZSCHKE, A. (1996): Wirkung von Produkten der Gülleaufbereitung auf Pflanzenertrag, N-Aufnahme und Nmin-Gehalt im Boden. - Bernburger Agrarber. 3: 49 – 60.
- OAD, F. C., BURIRO, U. A., AGHA, S. K. (2004): Effect of Organic and Inorganic Fertilizer Application on Maize Fodder Production. - Asian J. Plant Sci. 3: 375 – 377.
- PALOVE-BELANG, P., MISTRIC, I. (2002): Differential effect of amino acids on nitrate uptake by intact maize roots. - Biologica Bratislava. 57: 119 – 124.
- PFEFFERKORN, A. (1990): Einfluss extrem hoher C_r- und N_r-Gehalte im Boden auf N-Entzug, N-Verlagerung und Bodeneigenschaften auf Löß-Schwarzerde. - Diss, Univ. Halle-Wittenberg.
- RUSSOW, R., WEIGEL, A. (2000): Atmosphärischer N-Eintrag in Boden und Pflanze am Standort Bad Lauchstädt: Ergebnisse aus N-gestützten Direktmessungen (ITNI-System) im Vergleich zur indirekten Quantifizierung aus N-Bilanzen des Statischen Düngungsversuches. - Archiv f. Acker- u. Pflanzenbau u. Bodenkunde 45: 399 – 416.
- SCHROTMAYER, M., STAMP, P., FEIL, B. (1997): Ammonium Tolerance and Carbohydrate Status in Maize Cultivars. - Ann. Bot. 79: 25 – 30.
- SCHULZ, H., HÄRTLING, S., HUHN, G., MORGENSTERN, P., SCHÜÜRMAN, G. (1999): Nachweis ökotoxikologischer Wirkungen in Kiefernökosystemen - Ergebnisse einer langfristig angelegten Freilandstudie. - In: Oehlmann, J., Markert, B. (Hrsg.): Ökotoxikologie - Ökosystemare Ansätze und Methoden. - Ecomed. Landsberg.
- SCHULZ, H., SCHÄFER, T., STORBECK, V., HÄRTLING, S., RUDLOFF, R., KÖCK, M., BUSCOT, F. (2012): Effect of raw humus under two adult Scots pine stands on ectomycorrhization, nutritional status, N uptake, P uptake and growth of *P. sylvestris* seedlings. - Tree Physiol. 32: 36 – 48.
- SUTAR, R. K., PUJAR, A. M., KUMAR, B. N. A., HEBBUR, N. S. (2017): Sulphur Nutrition in Maize - A Critical Review.

- Int. J. Pure App. Biosci. 5 (6): 1582 – 1596.

WENDLAND, M., OFFENBERGER, K., HEIGL, L., ECKEL, T. (2018): Versuchsergebnisse aus Bayern 2016 – 2018. Unterschiedliche org. Düngermenge zu Silomais unter Einbeziehung von DSN und N-Simulation. -Bayerische Landesanstalt f. Landwirtschaft. Inst. F. Agrarökologie-Düngung. - <http://www.isip2.de/versuchsberichte/83787>.

Manuskript angenommen: 10. Oktober 2021

Anschrift des Autors:

Dr. Horst Schulz

Department Bodenökologie, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH - UFZ, Theodor-Lieser-Strasse 4, 6120 Halle (Saale)

Privat: Tulpenstrasse 3, 06126 Halle (Saale)

E-Mail: dr.horst.schulz@t-online.de