

Effekte einer punktuellen Düngerapplikation in Mais

Max Bouten, Till Meinel, Wolfgang Kath-Petersen

Die Steigerung der Düngereffizienz erfordert die Überarbeitung etablierter Verfahren und den Einsatz neuer Methoden und Verfahren. Dazu wurde ein System der punktgenauen Düngerapplikation im Maisanbau entwickelt und im Labor und im realen Einsatz getestet. Diese technische Entwicklung wurde von manuellen Feldversuchen zur Überprüfung der pflanzenbaulichen Relevanz dieser neuen Applikationsmethodik begleitet. Dabei zeigte sich ein ertragsneutrales Einsparpotenzial von bis zu 50 % der aktuellen Unterfußdüngergabe durch die präzisere Düngerapplikation. Bei gleichbleibendem Düngenniveau wurde eine signifikante Ertragssteigerung ($\alpha < 0,05$) von 6 bis 7 % dokumentiert. Auf Basis der Erkenntnisse der pflanzenbaulichen Versuche konnte ein Verfahren zur maschinellen Applikation der punktuellen Düngergabe entwickelt und validiert werden.

Schlüsselwörter

Maisaussaat, Unterfußdüngung, Feldversuche, Düngereffizienz

Die Bedeutung der Nährstoffeffizienz beim Einsatz von Düngemitteln ist in den letzten Jahren nicht zuletzt auch aufgrund der novellierten Düngeverordnung stark gestiegen. Dabei gilt es trotz reduzierter Düngeraufwandmengen weiterhin hohe Ertragsniveaus zu erreichen oder sogar zu steigern. Weiterhin wird der Einsatz von Pflanzenschutz- und Düngemitteln im modernen Ackerbau immer stärker in der Gesellschaft diskutiert. Der damit häufig einhergehende Akzeptanzverlust in der Bevölkerung kann und wird sich zukünftig auch auf politische Rahmenbedingungen und die Entwicklung landwirtschaftlicher Betriebe auswirken. Es gilt also, bestehende Verfahren zu analysieren, zu optimieren und, wenn notwendig, durch effizientere Verfahren und Techniken zu ersetzen.

Von der Technischen Hochschule Köln und der Kverneland Group Soest wurde im Rahmen des Forschungsprojektes PUDAMA – gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) – ein System zur punktgenauen Düngerapplikation im Maisanbau entwickelt. Ziel war zu untersuchen, wie sich die punktförmige, zum Saatkorn ortssynchrone Düngeablage im Vergleich zur konventionellen, bandförmigen Ablage auswirkt.

Grundlagen der Nährstoffversorgung bei Mais

Das Pflanzenwachstum wird allgemein von einer Vielzahl an Parametern beeinflusst. POORTER et. al. (2010) beschreiben die Gesamtheit des Pflanzenwachstums beispielsweise in vier Kategorien (Genotyp, Umgebungsbedingungen, ökologische Nische, weitere Einflussfaktoren). Die Nährstoffverfügbarkeit ist hierbei lediglich einer der insgesamt zwölf weiteren Einflussfaktoren. Im Rahmen dieser Arbeit wird dieser Einflussfaktor besonders im Hinblick auf den Nährstoffbedarf während der Jugendentwicklung betrachtet. Im Zeitraum der Jugendentwicklung nimmt der Mais nur einen geringen Anteil des Gesamtnährstoffbedarfes auf, beispielhaft werden nur etwa 10 bis 20 % des gesamten Phosphatbedarfes in der Jugendphase aufgenommen. Dennoch kann es speziell in diesen frühen Entwicklungsstadien zu Nährstoffmangel kommen (ZSCHEISCHLER 1984). Hinsichtlich der Verfügbarkeit muss zwischen geringer, wie beispielsweise bei Phosphor (P) und Kalium (K), und hoher Nährstoffmobilität im Boden, wie beispielsweise Stickstoff in Nitratform, unterschieden werden. Aufgrund der hohen Mobilität des Nitrats im Boden ist die Nährstoffaufnahme, bei ausreichendem Bodenvorrat, auch bei schwach ausgebildetem Wurzelsystem in ausreichendem Maße möglich (BEHRENS 2002). Demgegenüber haben BARBER und MACKAY (1986) einen direkten Zusammenhang zwischen der Wurzeldichte und der Phosphor- und Kaliumaufnahme bei Mais dokumentiert. Zudem konnten die Autoren zuvor einen direkten Zusammenhang zwischen der Bodentemperatur und der Phosphoraufnahme nachweisen (MACKAY und BARBER 1984). Einen Einfluss der Düngerplatzierung auf die Wurzelbildung des Mais haben CHASSOT et. al. (2001) publiziert, wobei in den durchgeführten Versuchen keine Aussage zum Ertragseinfluss quantifiziert werden konnte.

Dass eine übermäßige Phosphordüngung der Jungpflanze nicht erstrebenswert ist, konnten FERNANDEZ und RUBIO (2015) in ihren Versuchen belegen. Dabei zeigte sich eine Stärkung der Wurzelausprägung durch einen leichten P-Mangel der Pflanze. Die Autoren weisen jedoch darauf hin, dass ein erhöhter P-Mangel der Pflanze, der in der Regel durch eine purpurrote Verfärbung der Blätter sichtbar wird, den Vorteil der stärkeren Wurzelausprägung wieder aufheben kann. Neben dem, besonders bei geringen Temperaturen eingeschränkten, Aneignungsvermögen der Maispflanze in Abhängigkeit von der Wurzelbildung und der Bodentemperatur sollte auch die Platzierung der Nährstoffe berücksichtigt werden. So konnten ANGHINONI und BARBER (1980) eine effizientere Nährstoffaufnahme bei streifenweiser Ablage einer P-Düngergabe im Boden gegenüber einer gleichmäßig eingemischten P-Düngergabe in identischer Höhe feststellen. Dies wurde von den Autoren auf eine geringere Bindung des Phosphordüngers im nicht pflanzenverfügbaren Bodenvorrat zurückgeführt.

Die Summe der bisher bekannten pflanzenbaulichen Erkenntnisse hat zur Etablierung der Unterfußdüngung in vielen Regionen mit geringen Temperaturen während der Jugendentwicklung und niedrigen Nährstoffgehalten im Boden beigetragen, und zwar in Form einer Bandablage. Dabei konnten der positive Einfluss auf das Wurzelsystem und die Steigerung der Nährstoffeffizienz nachgewiesen werden, wobei ebenso der negative Einfluss einer zu hohen, zentralen Phosphorversorgung der Maispflanze dokumentiert wurde. Der Ansatz einer reduzierten, aber lokal stärker konzentrierten Düngergabe zu Beginn der Jugendphase kann somit als Weiterentwicklung des etablierten Verfahrens betrachtet werden. In praxisnahen Feldversuchen wurde der Effekt einer punktförmigen Düngerablage auf die Pflanzenentwicklung untersucht.

Material und Methoden

Zur Untersuchung der Auswirkungen der punktförmigen Düngeablage auf die Maispflanzen wurden dreijährige pflanzenbauliche Versuche mit bandförmig (konventionell) und manuell punktuell platzierten Unterfußdüngergaben durchgeführt und analysiert. Für die Untersuchung unter praxisnahen Versuchsbedingungen wurden im ersten und dritten Versuchsjahr (2017/2019) an drei Standorten, im zweiten Versuchsjahr (2018) an vier Standorten in zwei Regionen Parzellenversuche angelegt.

Für die Anlage und Durchführung der pflanzenbaulichen Versuche wurden Standorte im Rheinland sowie in Südwestfalen im ersten und am Niederrhein ab dem zweiten Versuchsjahr gewählt. Durch die räumliche Distanz zwischen den gewählten Standorten konnte das Risiko durch Unwetterereignisse reduziert und ein breiteres Spektrum praxisüblicher Bedingungen abgebildet werden. Die Übersicht der Charakteristika der Versuchsstandorte zeigt Tabelle 1. Dabei unterscheiden sich die Versuchsflächen neben den Bodenarten und -typen auch im Nährstoffversorgungsgrad, der anhand von Bodenuntersuchungen jährlich vor Vegetationsbeginn bestimmt wurde. Durch die fruchtfolgebedingte Rotation der Versuchsflächen ergeben sich unterschiedliche Nährstoffversorgungsgrade je nach Standort und Versuchsjahr. Neben den unterschiedlichen Bodenarten bilden die Versuchsflächen auch verschiedene Saatverfahren und Methoden der Saatbettbereitung ab. Dabei wurden intensivere Verfahren mit wendender Bodenbearbeitung ebenso betrachtet wie die stark reduzierte nicht wendende Bodenbearbeitung ohne tiefe Lockerung am Standort Rheinbach nach Zuckerrüben. Die Bodenbearbeitung, Saatbettbereitung und Bestandsführung wurde betriebsüblich durchgeführt.

Tabelle 1: Charakterisierung der Versuchsflächen mit Angabe der erfolgten Bodenbearbeitung, der maximalen Lockerungstiefe (ABT = Arbeitstiefe) und der Nährstoffversorgungsgrade nach Bodenuntersuchung

Versuchsfläche	Weilerswist	Rheinbach	Lippstadt	Hamminkeln	Bislich
Region	Rheinland		Südwestfalen	Niederrhein	
Anbaujahr	2017–2019	2017–2018	2017	2018–2019	2018–2019
Bodenart	lehmiger Schluff (IU)	schluffiger Lehm (uL)	lehmiger Sand (IS)	lehmiger Sand (IS)	sandiger Lehm (sL)
Bodentyp	Pseudogley-Vegan	Parabraunerde	Gleye	Gleye	Gleye
Grundbodenbearbeitung	Pflug 25 cm ABT	Kurzscheibenegge 10 cm ABT	Pflug 20 cm ABT	Pflug 25 cm ABT	Pflug 20 cm ABT
Saatbettbereitung	Kreiselegge	Kurzscheibenegge	Grubber	Kreiselegge	Kreiselegge
Vorfrucht	WG/KM/KM	ZR/ZR/-	SM	WG/AG	SM/ZR
Nährstoffversorgungsgrad nach Bodenuntersuchung (2017/2018/2019)					
Phosphor (P)	C/C/C	B/B/-	B/-/-	-/C/C	-/C/E
Kalium (K)	C/D/D	A/C/-	C/-/-	-/C/C	-/B/B
Magnesium (Mg)	C/C/D	C/D/-	B/-/-	-/C/D	-/D/D
Kupfer (Cu)	C/C/C	C/C/-	C/-/-	-/E/E	-/E/E
Mangan (Mn)	E/E/E	E/E/-	E/-/-	-/E/E	-/E/E
Bor (B)	C/C/C	C/C/-	C/-/-	-/C/A	-/C/C
Zink (Zn)	E/E/E	E/E/-	E/-/-	-/E/E	-/E/E
pH-Wert	B/B/B	B/C/-	B/-/-	-/B/B	-/C/C

Gehaltsklassen nach LUFA:

A = sehr gering; B = niedrig; C = anzustreben; D = hoch; E = sehr hoch

Vorfrucht: WG = Wintergerste; AG = Ackergras; ZR = Zuckerrüben; SM = Silomais; KM = Körnermais

Zur Untersuchung der aufgestellten Hypothese wurden je Versuchsfläche insgesamt fünf Düngungsvarianten mit Diammoniumphosphat (DAP 18+46) und eine Nullvariante mit je vier Wiederholungen angelegt:

- 100 % Aufwandmenge, konventionell und punktuell platziert (2017 bis 2019)
- 75 % Aufwandmenge, konventionell und punktuell platziert (2017 bis 2019)
- 50 % Aufwandmenge, punktuell platziert (ab 2018)
- Nullvariante ohne Unterfußdüngung (2017 bis 2019)

Die verwendeten Düngeraufwandmengen sind nach Standort und Versuchsjahr in Tabelle 2 aufgeführt. Am Standort Rheinbach wurde nach der Saat eine zweite Stickstoffdüngung durchgeführt, auf den weiteren Standorten wurde neben der Unterfußdüngung keine weitere Düngergabe ausgebracht. Jede Variante wurde sowohl in Normalsaat mit 75 cm und als Engsaat mit 37,5 cm Reihenweite angelegt. Aus den Kombinationen von Ausbringungsmenge, Ablageart und Wiederholung ergaben sich in Summe 48 Versuchspartellen (bzw. 40 im Jahr 2017) pro Standort.

Tabelle 2: Übersicht der standortspezifischen Nährstoffmengen je nach Variante, Standort und Versuchsjahr

Standort		Weilerswist	Rheinbach*	Lippstadt	Hamminkeln	Bislich
Jahr	Variante	Applizierte Düngermenge Diammoniumphosphat und Angabe der Gesamtnährstoffmenge (Gesamt-N/P ₂ O ₅) in kg ha ⁻¹				
2017	100 %	100 (18 / 46)	120 (122* / 55)	150 (27 / 69)	-	-
	75 %	75 (14 / 35)	90 (116* / 41)	110 (20 / 51)	-	-
2018	100 %	120 (22 / 55)	150 (127* / 69)	-	100 (18 / 46)	100 (18 / 46)
	75 %	90 (16 / 41)	110 (120* / 51)	-	75 (14 / 35)	75 (14 / 35)
	50 %	60 (11/28)	75 (114* / 35)	-	50 (9 / 23)	50 (9 / 23)
2019	100 %	120 (22 / 55)	-	-	120 (22 / 55)	100 (18 / 46)
	75 %	90 (16 / 41)	-	-	90 (16 / 41)	75 (14 / 35)
	50 %	60 (11/28)	-	-	60 (11/28)	50 (9 / 23)
Nullvariante		0 (0 / 0)	0 (100* / 0)	0 (0 / 0)	0 (0 / 0)	0 (0 / 0)

*Applikation einer zweiten Düngergabe mit 100 kg ha⁻¹ Gesamt-N nach der Saat.

Alle Versuchsglieder einer Reihenweite wurden in einem randomisierten Muster auf der Versuchsfläche angeordnet. Ausgehend von dem vorliegenden Nährstoffversorgungsgrad der Versuchsfläche für Phosphor wurde die 100%-Düngeraufwandmenge festgelegt. Daraus ergeben sich dann standortspezifisch die auf 75 und 50 % reduzierten Aufwandmengen, wobei die um 50 % reduzierte Aufwandmenge ausschließlich punktgenau angelegt wurde. Zusätzlich zur Unterfußdüngung wurde am Standort Rheinbach betriebsüblich eine zweite Stickstoffdüngung durchgeführt. Auf allen Standorten wurde Mais der Sorte Ricardinio (Beize: Mesuro1) vom Saatguthersteller KWS Saat mit einer Aussaatstärke von 8,9 Körnern je m² ausgesät, was einem Saatkornabstand von 15 cm bei 75 cm

Reihenweite entspricht. Die Aussaat aller Versuchsvarianten erfolgte mit einer vierreihigen Einzelkornsämaschine (Kverneland, Optima HD, Soest, Deutschland). Ebenso erfolgte die Unterfußdüngung der konventionellen Varianten mit einer Sämaschine, wobei die Düngerschare auch bei der Aussaat der Nullvariante und den punktuellen Varianten ohne maschinelle Düngergabe im Bodeneingriff waren, um Einflüsse durch eine geänderte Bodenverlagerung zu vermeiden.

Da für die punktuelle Düngerapplikation zu Beginn der pflanzenbaulichen Versuche noch keine maschinelle Lösung vorlag, wurden die Düngerportionen bei den punktgenauen Varianten über alle vier Reihen manuell platziert. Um das, zur Detektion der Kornposition, manuelle Freilegen der Saatkörner in den für die spätere Bonitur relevanten Reihen 2 und 3 zu vermeiden, ist die verwendete Sämaschine mit einer reihenübergreifenden Synchronisierung der elektrischen Vereinzlungsantriebe (Ausstattungsbezeichnung: GEO-Seed Level I) ausgerüstet. Dies ermöglichte eine zeitsynchrone Ablage der Saatkörner über alle vier Reihen, wodurch die indirekte Detektion der Saatkörner in Reihe 2 und 3 durch Freilegen der Körner in Reihe 1 und 4 möglich ist. Bei der manuellen Düngerplatzierung ist besonders auf eine abgestimmte zeitliche Abfolge der Arbeitsschritte zu achten, da die Gefahr einer starken Austrocknung der Saatfurche und einem daraus folgenden schlechteren Feldaufgang besteht. Ebenso erfordert die manuelle Platzierung jeder Düngerportion ein hohes Maß an Genauigkeit, um den angestrebten horizontalen Abstand zum Saatkorn von 5 cm einzuhalten. Dabei sind geringe Abweichungen nicht zu vermeiden. Regelmäßige Kontrollen der Ablagegenauigkeit stellen die Einhaltung der Anforderungen sicher. Ein Beispiel für solch eine Kontrolle zeigt Abbildung 1: Das Werkzeug zur manuellen Düngerapplikation legt eine etwa 50 mm lange und 10 mm breite Düngerportion parallel zur Saatreihe ab, wobei der horizontale und vertikale Abstand zwischen Saat- und Düngerablage identisch zur konventionellen bandförmigen Düngerablage sind.



Abbildung 1: Darstellung einer stichprobenartigen Kontrolle der manuellen Düngerapplikation durch Freilegen der Saatkörner und Vermessung des horizontalen Abstandes zwischen Dünger und Saatkorn (rechts) (© M. Bouten)

Jede Versuchsparzelle hatte eine Breite von drei Metern und eine Länge von zehn Metern, wobei für die Bonitur ausschließlich die mittleren zwei Reihen bzw. die mittleren vier bei Engsaat genutzt wurden. Zudem wurde der Anfangs- und Endbereich auf je zwei Metern Länge nicht betrachtet. Daraus ergab sich eine effektive Parzellenlänge von mindestens sechs Metern je Variante und Wiederholung. Für die Bewertung des Einflusses der Düngergabe auf die Pflanzenentwicklungen wurden über den Vegetationszeitraum je nach Zeitpunkt verschiedene Parameter dokumentiert:

- Feldaufgang
- Jugendentwicklung
 - Entwicklungsstadium nach BBCH
 - Pflanzenhöhe
 - Nährstoffmangelerscheinungen
- Ernte
 - Ganzpflanzenertrag (Engsaat)
 - Kornertrag (Normalsaat)

Der Schwerpunkt bei dieser Untersuchung lag in der Erfassung der Jugendentwicklung und dem Ertragsergebnis der Versuchsvarianten. Dabei wurde vom Feldaufgang bis zum Übergang in das Längenwachstum (BBCH 30 nach Biologische Bundesanstalt für Land und Forstwirtschaft 2001) wöchentlich das Entwicklungsstadium, die Pflanzenhöhe und eventuelle Nährstoffmangelerscheinungen bonitiert. Hierzu wurden pro Versuchsparzelle zehn zufällig gewählte Pflanzen markiert. Somit wurden pro Standort in Summe 480 Einzelpflanzen (400 im ersten Versuchsjahr) dokumentiert.

Zur Ertragserfassung wurde von jeder Versuchsparzelle ein Kernbereich mit mindestens 20 Einzelpflanzen händisch beerntet. Dabei wurden bei den Engsaatvarianten die gesamte Pflanze und bei den Normalsaatvarianten die Kolben entnommen. Die Zerkleinerung der Ganzpflanzen erfolgte unmittelbar nach dem Schnitt auf dem Feld, wobei aus vier Wiederholungen eine Mischprobe zur Untersuchung auf Inhaltstoffe gebildet wurde. Der Ausdrusch der Kolben und die Bestimmung der Kornfeuchte erfolgte innerhalb von 24 Stunden am Institut für Bau- und Landmaschinentechnik Köln. Die Kornfeuchte wurde dabei mit einem Handgerät (Pfeuffer, HE50, Kitzingen, Deutschland) in dreifacher Wiederholung gemessen. Zudem wurde die Feuchtebestimmung mit Trockenschrankproben verifiziert.

Ergebnisse und Diskussion

Der mittlere Feldaufgang der dreijährigen Versuche liegt über alle Versuchsvarianten und Standorte bei über 90 %. Die maximale Differenz der Mittelwerte beträgt dabei 1,6 %. Die Unterschiede zwischen den Versuchsvarianten sind nicht signifikant ($\alpha = 0,05$). Damit bestätigt der gleichmäßige Feldaufgang die Vorgehensweise der Versuchsanlage hinsichtlich des manuellen Eingriffs zur Düngerplatzierung und bildet die Grundlage für die weitere Untersuchung der Jugendentwicklung und des Ertrages.

Jugendentwicklung

Der Vergleich der Versuchsvarianten während der Jugendentwicklung erfolgt anhand des Entwicklungsstadiums, der Pflanzenhöhe und optischer Nährstoffmangelerscheinungen. In Hinblick auf den Vergleich des Entwicklungsstadiums konnten im Rahmen dieser Versuche mit wöchentlicher Bonitur der Versuchsflächen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten festgestellt werden.

Während des Versuchszeitraums zeigten sich auch nur auf einer Fläche (Rheinbach) im Jahr 2017 vermehrte Nährstoffmanglerscheinungen. Die Lila-Färbung der Blätter deutete dabei auf einen Phosphormangel hin. Trotz 100 % Düngeraufwandmenge hatten 89 % der mit konventioneller Düngerablage gedüngten Pflanzen leichte bis mittlere Mangelerscheinungen. Dem gegenüber zeigten bei gleicher Aufwandmenge und punktueller Ablage nur 20 % der Pflanzen diese Mangelerscheinungen. Bei reduzierter Düngeraufwandmenge von 75 % und punktueller Ablage wiesen 28 % der Pflanzen leichte Nährstoffmanglerscheinungen auf. Da auf den weiteren Standorten auch in den folgenden Versuchsjahren keine Mangelerscheinungen auftraten, ist die Datengrundlage zu dieser Thematik noch gering.

Die Ergebnisse zur Pflanzenhöhe zeigen zumeist eine signifikante Differenzierung zwischen den Varianten. Abbildung 2 zeigt die mittlere relative Pflanzenhöhe beim Übergang von der Jugendentwicklung zum Längenwachstum (BBCH 19/30). Alle Ergebnisse werden hierbei zur Vergleichbarkeit auf die 100 % konventionelle Variante der jeweiligen Reihenweite referenziert.

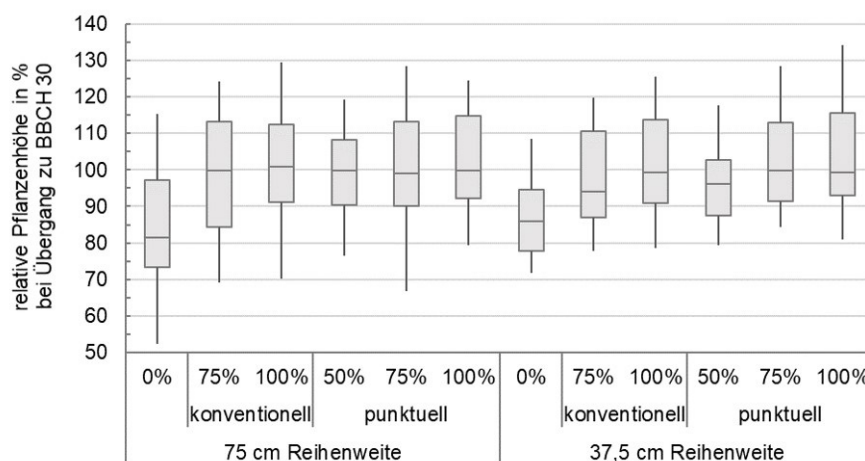


Abbildung 2: Boxplot der relativen Pflanzenhöhe der Versuchsvarianten bei Übergang zum Längenwachstum in Normal- und Engsaat über alle Versuchspartellen und -jahre ($n = 412$). Die Einzelergebnisse sind auf die Variante „100 % konventionell“ der jeweiligen Reihenweite normiert.

Der Vergleich zwischen der Nullvariante und den gedüngten Varianten zeigt den positiven Einfluss einer Unterfußgabe auf die Jugendentwicklung (Tabelle 3), und zwar unabhängig von der Reihenweite und der Düngerplatzierung. Zwischen den gedüngten Varianten sind die Unterschiede über den gesamten Versuchszeitraum und alle Standorte gering, wobei besonders im Jahr 2017 Unterschiede von über 20 % zwischen den beiden 100 % gedüngten Varianten festgestellt wurden (BOUTEN et al. 2019a). Insgesamt zeigt sich auch im Vergleich der gedüngten Varianten nur ein geringer Einfluss der Reihenweite auf das qualitative Ergebnis der Pflanzenhöhe. Die mit halber Aufwandmenge punktuell gedüngten Varianten sind bei beiden Reihenweiten signifikant kleiner gegenüber der Variante 100 % konventionell (t-Test, $\alpha = 0,05$). Ebenso ist die um 25 % reduzierte konventionelle Variante geringfügig kleiner als die 100 % Variante, jedoch nicht signifikant. Dem gegenüber zeigt die Variante mit gleicher Aufwandmenge und punktueller Platzierung einen positiven, nicht signifikanten Effekt auf die Pflanzenhöhe.

Tabelle 3: Relative mittlere Pflanzenhöhe der Versuchspartzen zum Abschluss der Jugendentwicklung (BBCH 19/30) über alle Standorte und Versuchsjahre normiert zur Referenzvariante „100 % konventionell“

Aufwandmenge DAP	Platzierung	Relative Pflanzenhöhe in %	
		75 cm Reihenweite	37,5 cm Reihenweite
0 %	-	83 ^{a *}	87 ^a
50 %	punktuell	97 ^b	96 ^b
	konventionell	98 ^{bc}	98 ^{bc}
75 %	punktuell	101 ^{cd}	103 ^d
	konventionell (Referenz)	100 ^{cd}	100 ^{cd}
100 %	punktuell	103 ^d	104 ^d

* Die Buchstaben kennzeichnen die Signifikanzklassen (t-Test, $\alpha = 0,05$), ein Vergleich ist nur innerhalb einer Spalte möglich.

Der Vergleich bei 100 % Aufwandmenge zeigt eine positive Tendenz zugunsten der punktuellen Platzierung. Aufgrund der unterschiedlichen Ausprägung dieses positiven Effektes über die Standorte und Jahre sind die Unterschiede von drei und vier Prozent nicht signifikant. Zusammenfassend zeigt sich zum Abschluss der Jugendentwicklung bei allen Varianten mit gleicher Aufwandmenge ein Potenzial zugunsten der punktuellen Platzierung. Zudem zeigen sich bei einer Düngerreduzierung um 25 % keine negativen Auswirkungen auf die Jugendentwicklung. Aufgrund der vielfältigen Einflussparameter, die zur Ertragsbildung beitragen, wurde der Einfluss der punktuellen Düngergabe auch im Ertrag untersucht.

Ertragsergebnis

Die Ertragsergebnisse werden analog zur Analyse der Jugendentwicklung auf die Variante 100 % konventionell normiert. Abbildung 3 zeigt das relative Ertragsergebnis der dreijährigen Feldversuche.

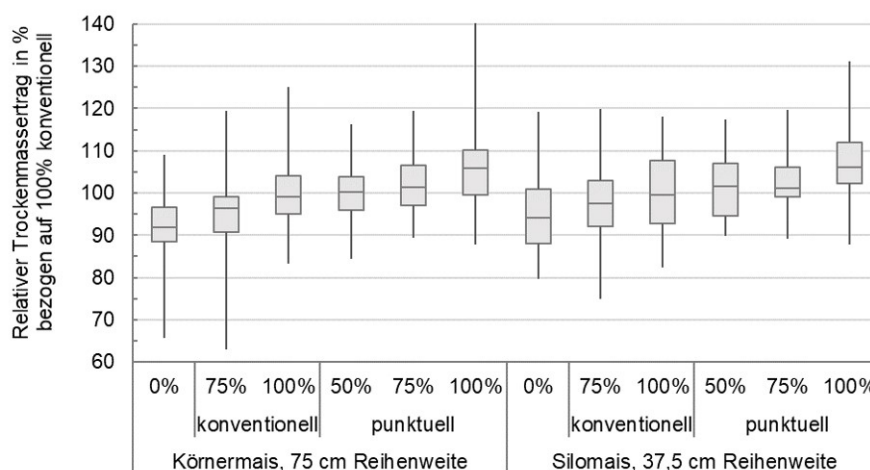


Abbildung 3: Relativer Trockenmasseertrag der Versuchsvarianten (n = 397) als Körner- und Silomais über alle Versuchspartzen und -jahre. (Die Einzelergebnisse sind auf die Variante 100 % konventionell der jeweiligen Reihenweite normiert; 100 % entsprechen 90 dt TM ha⁻¹ im Körnermais und 149 dt TM ha⁻¹ im Silomais.)

Im direkten Vergleich der gedüngten Varianten mit 100 % Aufwandmenge zeigt sich durch die punktuelle Platzierung im TM-Kornertrag ein Vorteil von 6 % und im TM-Silomaisertrag ein Vorteil von 7 % . Diese Unterschiede sind signifikant ($\alpha = 0,05$), sodass ein Mehrertrag durch die punktuelle

Düngerapplikation bei gleicher Aufwandmenge im Rahmen der Versuche bestätigt werden kann. Das quantitative Ertragsresultat in Bezug auf die Referenzvariante zeigt Tabelle 4.

Tabelle 4: Mittlerer Trockenmasseertrag über alle Standorte und Versuchsjahre normiert zur jeweiligen Referenzvariante „100 % konventionell“

Aufwandmenge DAP	Platzierung	Relativer TM-Ertrag in %	
		Körnermais *	Silomais
0 %	-	92 a **	94 a
50 %	punktuell	100 b	102 bc
	konventionell	96 a	98 ab
75 %	punktuell	102 b	103 bc
	konventionell (Referenz)	100 b	100 b
100 %	punktuell	106 c	107 c

* Körnermais hat 75 cm und Silomais 37,5 cm Reihenweite.

** Buchstaben kennzeichnen die Signifikanzklassen (t-Test, $\alpha = 0,05$), ein Vergleich ist nur innerhalb einer Spalte möglich.

Diskussion

Die Ergebnisse der Ertragsfeststellung der dreijährigen pflanzenbaulichen Untersuchungen zeigen zum einen unter den vorliegenden Versuchsbedingungen einen signifikanten Ertragsvorteil bei Applikation einer konventionellen Unterfußgabe. Zum anderen bestätigen die Versuchsdaten ein Effizienzsteigerungspotenzial bei punktueller Platzierung dieser Unterfußgabe. Bei betriebsüblicher Düngeraufwandmenge konnte ein signifikanter Ertragsvorteil durch die punktuelle Platzierung über die drei Jahre nachgewiesen werden. Die punktuelle Platzierung zeigt zudem bei 25 % reduzierter Düngeraufwandmenge keine negativen Effekte auf die Jugendentwicklung oder den Ertrag. Bei einer 50 % reduzierten punktuellen Platzierung gab es ebenfalls keine Ertragsnachteile, wie aus dem zweijährigen Versuch hervorging.

Die pflanzenbaulichen Feldversuche bestätigen insgesamt die aufgestellte Hypothese zur Steigerung der Düngereffizienz durch die punktuelle Düngerplatzierung bei der Maisaussaat. Die Gründe für diese Effizienzsteigerung können auf verschiedenen Zusammenhängen beruhen: Zum einen findet durch die räumliche Abgrenzung der Düngergabe eine geringere Festlegung der leichtlöslichen Phosphate im Bodenvorrat statt, was speziell bei niedrigeren Bodenversorgungsgraden eine zunehmende Bedeutung hat. Dies hat sich besonders am Standort Rheinbach mit tendenziell geringerem P-Versorgungsgrad und reduzierter Bodenbearbeitung in einer signifikanten Steigerung sowohl der Jugendentwicklung als auch des Ertrags gezeigt. Eine Aussage zum Einfluss der Bodenart auf die Wahl der Düngerablage kann auf Basis der vorliegenden Versuchsdaten nicht getroffen werden.

Bereits ANGHINONI und BARBER (1980) haben einen Vorteil der streifenweisen Platzierung eines P-Düngers gegenüber der Einmischung festgestellt, sodass die punktuelle Düngerapplikation hier als weiterer Entwicklungsschritt betrachtet werden kann. Zum anderen kann aufgrund der gezielten Platzierung einer geringen Düngermenge das Risiko einer Mangelversorgung verringert werden. Hinsichtlich der von FERNANDEZ und RUBIO (2015) untersuchten Gunstwirkung eines geringfügigen P-Mangels auf die Entwicklung im Mais kann so eine gezieltere Steuerung der Pflanzenentwicklung erreicht werden. Hinsichtlich der Wurzelentwicklung stellt sich die Frage, welchen Einfluss die punktuell hoch konzentrierte Düngerapplikation auf die Wurzelverteilung hat.

Das im Rahmen dieser Versuche gute Ertragsergebnis der Nullvariante kann verschiedene Ursachen haben. Zum einen waren die Böden der Versuchsstandorte in der Regel gut bis sehr gut versorgt, wodurch bei passender Witterung auch ohne Unterfußdüngung im Frühjahr keine Nährstoffmangelerscheinungen aufgetreten sind. Zum anderen ist der Mais, wie bereits beschrieben, in der Lage kurzzeitigen Nährstoffmangel bei guten Bedingungen vollständig auszugleichen. Da mit Ausnahme des Standortes Rheinbach keine zusätzliche Düngergabe erfolgte, war das Gesamtnährstoffangebot grundsätzlich reduziert, was somit ebenso ertragsbegrenzend wirken kann.

Ausblick

Die Ergebnisse bestätigen die Hypothese der Düngereffizienzsteigerung durch eine punktuelle Düngerapplikation 5 cm neben und unter dem Saatkorn. Zur Quantifizierung der einzelnen Einflussfaktoren wie Bodenart, -versorgungsgrad, Düngerart oder auch der Einfluss der Maissorte sind noch weitere Untersuchungen in den nächsten Jahren notwendig. Besonders die Bedeutung der Düngerablage für das Wurzelwachstum und die ganzheitliche Nährstoffaufnahme sind dabei von großem Interesse für eine zielgerichtete Weiterentwicklung der Düngerapplikationstechnik hin zur Maximierung der Düngeeffizienz.

Vor dem Hintergrund einer möglichen Reduzierung der anzustrebenden Bodennährstoffgehalte und der Reduzierung der zulässigen Nährstoffmengen sind neue Ansätze und Verfahren zur Düngung notwendig. BOUTEN et al. (2019b) stellten im Rahmen dieses Projektes ein technisches Verfahren zur maschinellen Applikation der hier untersuchten Düngerportionen vor, welches inzwischen vom Projektpartner Kverneland zur Serienreife weiterentwickelt wird. Somit lassen sich künftig großflächige Versuche für die weitere Optimierung des Verfahrens durchführen.

Literatur

- Anghinoni, I.; Barber, S. A. (1980): Predicting the Most Efficient Phosphorus Placement for Corn. Soil Science Society of America Journal 44(5). pp. 1016–1020, <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050029x>
- Barber, S. A.; Mackay, A. D. (1986): Root growth and phosphorus and potassium uptake by two corn genotypes in the field. In: Fertilizer research 10(3). pp. 217–230, <https://doi.org/10.1007/BF01049351>
- Behrens, T. (2002): Bedeutung unterschiedlicher Wurzelzonen für die Nährstoffaufnahme von Mais (*Zea mays* L.) am Beispiel von Nitrat, Diplomarbeit, Universität Göttingen, Göttingen
- Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft (2001): Entwicklungsstadien mono- und dikotyler Pflanzen, BBCH Monografie, Braunschweig, S. 165
- Bouten, M.; Meinel, T.; Kath-Petersen, W. (2019a): Untersuchung des Einflusses einer diskontinuierlichen Ablage der P-Unterfußdüngung bei Mais – erste einjährige Ergebnisse von Feldversuchen. LANDTECHNIK, 74(1/2), <https://doi.org/10.1515/lt.2019.3202>, S. 25–35
- Bouten, M.; Meinel, T.; Kath-Petersen, W. (2019b): Development and utilization of a new application system for precise fertilizer placement in corn. VDI-Berichte 2361, pp. 513–521, VDI-Verlag, Düsseldorf
- Chassot, A.; Stamp, P.; Richner, W. (2001): Root distribution and morphology of maize seedlings as affected by tillage and fertilizer placement. Plant Soil 231, pp. 123–135
- Fernandez, M. C.; Rubio, G. (2015): Root morphological traits related to phosphorus-uptake efficiency of soybean, sunflower, and maize. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 178(5), pp. 807–815, <https://doi.org/10.1002/jpln.201500155>
- Mackay, A. D.; Barber, S. A. (1984): Soil Temperature Effects on Root Growth and Phosphorus Uptake by Corn. Soil Science Society of America Journal 48(4), pp. 818–823, <https://doi.org/10.2136/sssaj1984.03615995004800040024x>

Poorter, H.; Niinemets, U.; Walter, A.; Fiorani, F.; Schurr, U. (2010): A method to construct dose-response curves for a wide range of environmental factors and plant traits by means of a meta-analysis of phenotypic data, In: Journal of Experimental Botany 61(8), pp. 2043–2055, <https://doi.org/10.1093/jxb/erp358>

Zscheischler, J. (1984): Handbuch Mais. Anbau - Verwertung - Fütterung. 3. Auflage, DLG-Verlag, Frankfurt am Main, S. 11-101

Autoren

Max Bouten, M.Sc. ist Research Engineer im Innovation Center Europe der Kubota Holdings Europe in Nieuw-Venep (NL) und war wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Bau- und Landmaschinentechnik der TH Köln.

E-Mail: max.bouten@kubota.com

Prof. Dr. Ing. Till Meinel und **Prof. Dr. agr. Wolfgang Kath-Petersen** sind Professoren am Institut für Bau- und Landmaschinentechnik, Technische Hochschule Köln, Betzdorfer Straße 2, 50679 Köln

Danksagungen

Das Projekt wurde von dem Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft und der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung gefördert. Die Autoren danken der KWS Saat für die Bereitstellung des Saatgutes. Besonderer Dank gilt auch den Landwirten für die Bereitstellung der Versuchsflächen.