



Injektionsdüngung



Dr. Martin Kücke
Prof. Dr. Heinrich W. Scherer

Injektionsdüngung in Deutschland Stand des Wissens und Erfahrungen bei der Umsetzung

April 2006

Nachdruck März 2008

Dr. Martin Kücke, Institut für Pflanzenbau und Grünlandwirtschaft, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Bundesallee 50, 38116 Braunschweig

Prof. Dr. Heinrich W. Scherer ist Professor am Institut für Pflanzenernährung der Universität Bonn, Karlobert-Kreiten-Straße 13, 53115 Bonn

Herausgeber:

Rationalisierungs-Kuratorium für Landwirtschaft (RKL)

Leiter: Dr. Hardwin Traulsen

Am Kamp 13, 24768 Rendsburg, Tel. 04331-847940, Fax: 04331-847950

Internet: www.rkl-info.de; E-mail: mail@rkl-info.de

Sonderdruck aus der Kartei für Rationalisierung 4.1.1.2.0

Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit Zustimmung des Herausgebers

Was ist das RKL?

Das Rationalisierungs-Kuratorium für Landwirtschaft ist ein bundesweit tätiges Beratungsunternehmen mit dem Ziel, Erfahrungen zu allen Fragen der Rationalisierung in der Landwirtschaft zu vermitteln. Dazu gibt das RKL Schriften heraus, die sich mit jeweils einem Schwerpunktthema befassen. In vertraulichen Rundschreiben werden Tipps und Erfahrungen von Praktikern weitergegeben. Auf Anforderung werden auch einzelbetriebliche Beratungen durchgeführt. Dem RKL sind fast 1400 Betriebe aus dem ganzen Bundesgebiet angeschlossen.

Wer mehr will als andere, muss zuerst mehr wissen. Das RKL gibt Ihnen wichtige Anregungen und Informationen.

Gliederung	Seite
1. Einleitung und Problemstellung.....	399
2. Prinzip und Technik	400
2.1 Besonderheiten des CULTAN-Verfahrens	402
2.2 Pflanzenphysiologische Aspekte	404
2.3 Ökologische Aspekte.....	406
2.4 Ökonomische Aspekte	409
2.5 Injektionsdüngung bei Mulch- und Direktsaat.....	410
3. Versuchsergebnisse	412
3.1 Erfahrungen aus der Praxis.....	414
3.1.1 Kartoffeln.....	416
3.1.2 Zuckerrüben.....	418
3.1.3 Getreide	420
3.1.4 Feldgras.....	423
4. Fazit.....	425
4.1 Ausblick.....	427
5. Literatur.....	428

1. Einleitung und Problemstellung

Das Ziel, die Nährstoffverluste bei der Stickstoffdüngung zu reduzieren führte zu verschiedenen Lösungsansätzen für die Praxis. So kommen heute bereits Sensorsysteme zur angepassten N-Düngung und Dünger mit Nitrifikationsinhibitoren zum Einsatz. Eine weitere Möglichkeit bietet die Landtechnik durch die Injektionsdüngung.

Seit Mitte der 90er Jahre bieten Lohnunternehmer die Injektion von Flüssigdüngern an, und das Interesse der Praktiker an diesem Verfahren nimmt zu. Ursächlich hierfür ist, dass die von der Düngung ausgehenden Probleme (Nitratauswaschung, Ammoniakverluste, Oberflächenabschwemmung, Nitratgehalte in Gemüse und Kartoffeln) mit den bisherigen Düngungskonzepten nicht befriedigend gelöst werden konnten. Zudem sind die Praktiker durch die zunehmende Regulierung der Düngung (Düngeverordnung, Wasserrahmenrichtlinie) eingeengt. Dabei ist die Injektionsdüngung nicht neu, sondern wird in Kanada, den USA und Australien in bestimmten Regionen seit Jahrzehnten als Standardmaßnahme eingesetzt.

In Deutschland ist die Injektionsdüngung durch die Arbeiten von SOMMER (2005) schon in den 70er Jahren unter dem Begriff „CULTAN“ (**C**ontrolled **U**ptake **L**ong-**T**erm **A**mmonium **N**utrition) bekannt geworden, doch scheiterte die praktische Umsetzung in großflächigen Ackerkulturen an der nicht verfügbaren Injektionstechnik. Vor dem Hintergrund der technischen Entwicklung verspricht das Verfahren einige der bekannten Düngungsprobleme (z.B. Auswaschung,

Ammoniakverluste) zu entschärfen und für die Praktiker ökologische Vorteile mit ökonomischen (Verringerung der Anzahl von Überfahrten - Kraftstoff, Arbeitszeit -) vereinigen zu können.

2. Prinzip und Technik

Eine verlustmindernde Ausbringung von Düngemitteln ist zum Beispiel über die Platzierung von Düngemitteln in den Boden möglich. Die Injektion von Dünger in den Boden vor oder nach der Aussaat stellt eine wirksame Verbesserung der Nährstoffeffizienz dar, da so der Weg zwischen sich entwickelnder Wurzel und Nährstoffdepot verkürzt wird.

Dieser Transport ist auch in Trockenphasen, in denen die Bodenoberfläche bereits ausgetrocknet ist, noch gewährleistet. So ist die Düngemittelplatzierung mit Festdüngern im Maisanbau eine unbestrittene Standardmaßnahme.

Die Fachwelt geht sehr ausführlich auf die Platzierungsverfahren bei der Düngung ein. Hier wird einerseits zwischen der breitwürfigen und platzierten Ausbringung, daneben zwischen der oberflächlichen und unterirdischen Ausbringung sowie der Ausbringung vor, bei oder nach der Saat bzw. dem Pflanzen unterschieden (Havlin et al. 1999). Zunächst sah man die Unterfußdüngung nur als eine Startdüngung an, bei der eine kleine Düngergabe zur Förderung des Jugendwachstums ausgebracht wird (i.d.R. vor oder zur Saat). Aktueller ist die Unterfußdüngung mit hohen Düngegaben, die den Bedarf der Kulturpflanzen während des gesamten Wachstums bis zur Ernte decken sollen, wie dies auch beim CULTAN-Verfahren angestrebt wird. Man kann hier zwischen Punktinjektion und Bandablage auf der Bodenoberfläche und in dem Boden unterscheiden.

Für die Punktinjektion stehen seit Ende der 90er Jahre auch in Deutschland Sternrad-Injektoren (spoke wheel injector) zur Verfügung (Abb. 1B). Kennzeichnend für diese Applikationstechnik sind Sternräder, in welche die Düngerlösung in eine spezielle Narbe und von dort in die Spitzen (Spokes) geleitet wird (Abb. 1A), wenn die Spitze sich im Boden befindet. Diese Sternradinjektionstechnik wird mit Arbeitsbreiten bis zu 18 m angeboten. Mit einer Fahrgeschwindigkeit von 10-15 km/h kann dann die Ausbringung des Düngers erfolgen. In der Regel sind die Räder im Abstand von 25 cm montiert, und die Spitzen auf dem Rad weisen eine Länge von 8 cm und einen Abstand von 17 cm zueinander auf.

Eine flache, oberflächennahe Bandablage wird mit dem überwiegend für Getreide empfohlenen Striegelapplikationsgerät erreicht (Abb. 1F), während Injektionsschare (Abb. 1G) in Reihenkulturen eine Bandablage tiefer 7 cm ermöglichen. Eine Hochdruckinjektion, bei der die Düngerlösung aus Düsen oberhalb der

Bodenoberfläche mit hohem Druck in den Boden gestrahlt wird, ist weltweit in der Diskussion und befindet sich in der Versuchsphase.



Abb. 1: Beispiele für Flüssigdünger-Injektionsgeräte

Fotos: A, B, G: Kücke, FAL Braunschweig; C: Kahnert, Maschinen- und Antriebstechnik GmbH Güstrow; D, E: Conrady, Bollmer Umwelt-GmbH Wietmarschen, F: Kuhlenkamp, Elisabethenhof

2.1 Besonderheiten des CULTAN-Verfahrens

Das von SOMMER (2005) entwickelte CULTAN-Verfahren lässt sich so charakterisieren:

- Aus ertragsphysiologischen Gründen wird eine möglichst weitgehende Stickstoffversorgung der Kulturpflanzen mit Ammonium angestrebt, indem ammoniumhaltige N-Dünger konzentriert in Wurzelnähe injiziert werden.
- Am Ort der Platzierung entsteht eine hohe Ammoniumkonzentration, durch welche die mikrobielle Nitrifikation des Ammoniums gehemmt wird.

Diese von SOMMER bezeichneten „Hotspots“ werden von den Wurzeln umgeben. In den pflanzenverträglichen Diffusionszonen der Depots reagieren die Wurzeln auf das hohe Nährstoffangebot mit der Bildung eines dichten Filzes um diese Zone, aus der sie den Stickstoff als Ammonium aufzunehmen vermögen (Abb. 2). Um diese Düngungsstrategie von anderen Düngungsverfahren mit ammoniumhaltigen Düngern abzugrenzen, bezeichnete SOMMER dieses Verfahren als CULTAN-Verfahren (Controlled Uptake Long-Term Ammonium Nutrition), was mit „kontrollierte, langfristige Ammonium Ernährung“ übersetzt werden kann.

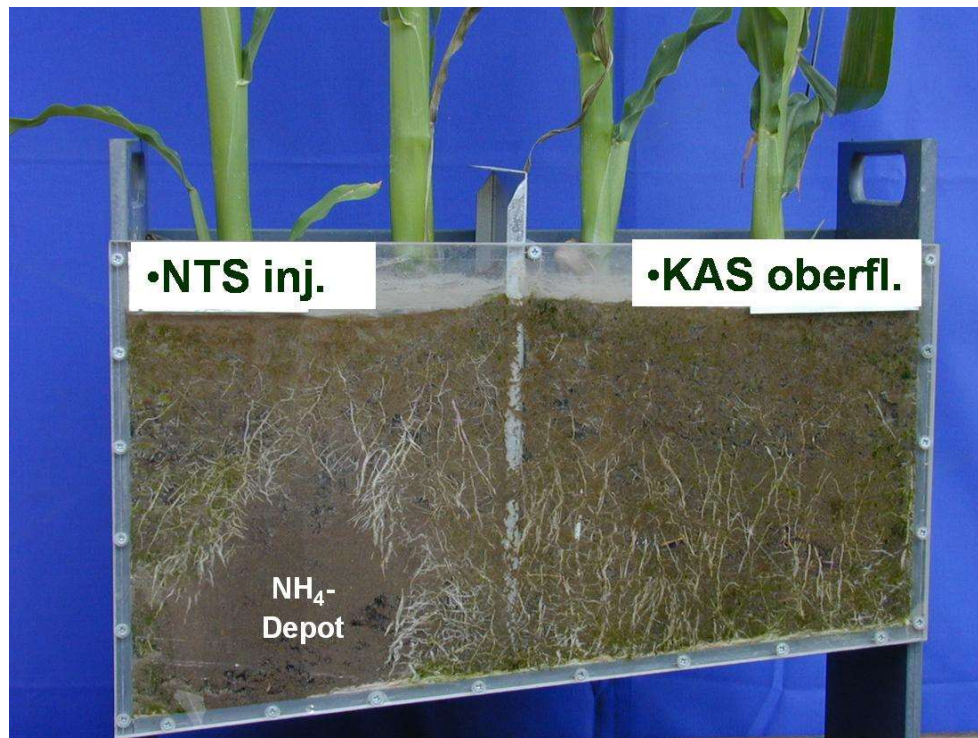


Abb. 2: Wurzelbild von Mais bei N-Injektion und oberflächlicher Düngung
(Foto: Kücke)

Der mit der Platzierung im Boden erzielte Nährstoffkonzentrationseffekt wird in Abb. 3 schematisch verdeutlicht: Durch die Platzierung werden lokal im Boden die Nährstoffkonzentrationen um ein Vielfaches gegenüber einer homogenen Verteilung angehoben, wodurch die Festlegungs- und mikrobiellen Umsetzungsprozesse minimiert und die Pflanzenverfügbarkeit lokal deutlich erhöht wird. Geht man von einer N-Gabe von 100 kg N/ha aus, dann werden je Quadratmeter 10 g N und je nach N-Gehalten des Flüssigdüngers (10,5 – 33 kg N/100 Liter) ca. 30 bis 100 ml Düngertlösung ausgebracht. Bei einem Abstand der Sternräder von 25 cm und einem Spokeabstand von 17 cm verteilt sich dies im Mittel auf 18 Injektionspunkte/m², so dass je Injektionspunkt 1,6 bis 5,6 ml ausgebracht werden. Geht man davon aus, dass sich die Depots durch nachfolgende Diffusionsprozesse auf Golf- bis Tennisballgröße erweitern, dann ergibt sich rechnerisch ein Anteil von 0,1 bis 0,8 % des durch die Depots beeinflussten Krumenbodens (bei 25 cm Krumenmächtigkeit). Daraus lässt sich ableiten, dass bei der N-Injektionsdüngung rein rechnerisch die N-Menge im Depot etwa um den Faktor 100 bis 1000 gegenüber einer gleichmäßigen Verteilung in der Krume erhöht ist, je nachdem, ob man von der hohen Konzentration im Zentrum oder der niedrigeren Randbereiche des Depots ausgeht. Mit den N-Depots kommt aber nicht, wie häufig vermutet wird, das gesamte Wurzelsystem in Berührung, sondern nur ein kleiner Teil. Auch bei Injektionsdüngung durchwurzeln die Pflanzen das Bodenprofil und nehmen aus den tieferen Bodenschichten auch Nitrat auf, welches im Boden vorhanden und während des Pflanzenwachstums aus organischer Düngung oder Humus mineralisiert wird. Der im Frühjahr nach N_{min} im Bodenprofil ermittelte Stickstoff ist daher auch nach Injektionsdüngung für die Pflanzen voll verfügbar.

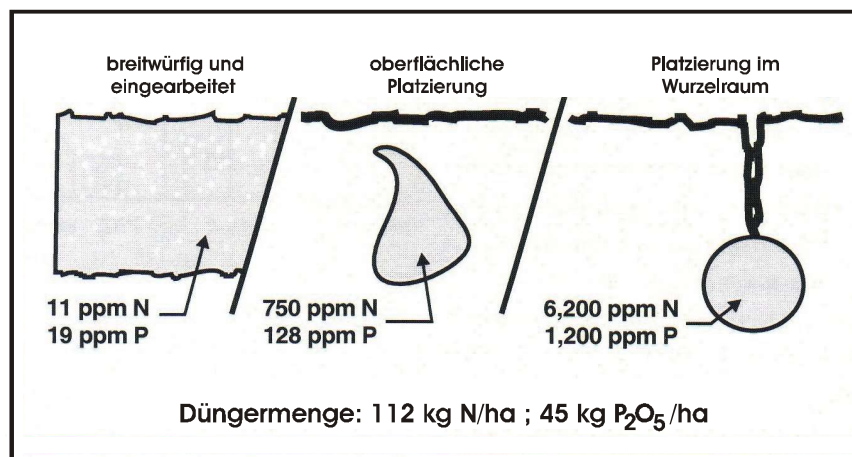


Abb. 3: Schematische Darstellung der Nährstoffkonzentrationen im Boden nach Einarbeitung, oberflächlicher (Mitte) und unterirdischer Platzierung (LOHRY 1998)

Als ideale Dünger für das CULTAN-Verfahren sieht SOMMER Ammoniak oder ammoniakhaltige Lösungen an. Da diese jedoch in Deutschland nicht verfügbar sind, empfiehlt er Salzlösungen mit kulturartabhängigen Mindestanteilen an Ammonium

und Höchstgehalten an Nitrat und Harnstoff. Generell sollte der Anteil an $\text{NH}_4\text{-N}$ am Gesamt-N $> 30\%$ liegen. Nitratfreie N-Lösungen mit Ammonium und Harnstoff empfiehlt er für Grünland, Kartoffeln, Raps, für Getreide N-Lösungen mit Gehalten an Nitrat-N $< 25\%$ und an Harnstoff-N von $< 50\%$. Harnstoff wird im Depot zu Ammonium umgesetzt und erhöht so die lokale Ammoniumkonzentration.

Das CULTAN-Verfahren ist nicht an die Verwendung von Flüssigdüngern gebunden, SOMMER empfiehlt auch feste N-Depots (wie Becherdepots) im Gemüse und Zierpflanzenanbau. Nach dieser Definition stellt die Unterfußdüngung mit Diammonphosphat ebenfalls eine Düngung nach dem CULTAN-Verfahren da, zumindest so lange, wie die N-Versorgung über das Düngeband erfolgt.

2.2 Pflanzenphysiologische Aspekte

Bei breitwürfiger und oberflächlicher Ausbringung von Düngemitteln, gleich welcher Zusammensetzung (Nitrat, Ammonium, Harnstoff), müssen die Düngesalze zunächst gelöst und anschließend durch die Wasserbewegung im Boden zur Wurzel transportiert werden. Auf diesem, im Vergleich zur platzierten N-Düngung langen Weg zur Wurzel wird der weitaus überwiegende Teil des Harnstoffs hydrolysiert und Ammonium nitrifiziert, so dass es bei der gängigen Düngepraxis in Ackerböden nahezu immer zu einer ausschließlichen Nitraternährung der Pflanzen kommt.

Während nach konventioneller Oberflächendüngung Nitrat mit dem Transpirationswasser überwiegend in die grünen Pflanzenteile transportiert und dort entweder zu Ammonium reduziert wird oder in den Vakuolen gespeichert wird, wird Ammonium direkt nach der Aufnahme bereits in den Wurzeln an lösliche Kohlenhydrate gebunden. Anders als bei der Nitraternährung findet somit die Aminosäuresynthese in der Wurzel statt. Von der höheren Anlieferung von löslichen Kohlenhydraten an die Wurzel profitieren die Wurzeln und reagieren mit einem stärkeren Wurzelwachstum. Daher bezeichnet SOMMER diese Form der N-Versorgung auch als „wurzeldominant“, im Gegensatz zur „sproßdominanten“ Nitratversorgung, bei welcher der überwiegende Teil der N-Assimilation im Spross stattfindet. Bei Ammoniumernährung entfällt der Energie verbrauchende Schritt der Nitratreduktion im Pflanzenstoffwechsel.

Ergebnisse aus zahlreichen Gefäß- und Nährlösungsversuchen lassen aber den Schluss zu, dass hinsichtlich Wachstum und Ertrag eine N-Ernährung mit je 50% Ammonium und Nitrat i.d.R. den Idealzustand darstellt. Diesem Idealzustand nahe zu kommen ist in Ackerböden nur mit einer Ammoniumplatzierung möglich. Da die Wurzeln das Ammoniumdepot umwachsen und der Transportweg für die

Ammoniumionen zur Wurzel sehr kurz ist, kann ein großer Teil des angebotenen Ammoniums auch die Pflanze als Ammonium erreichen und als solches aufgenommen werden (SOMMER 2005).

Die Pflanzen reagieren bei guten Voraussetzungen mit einem typischen Erscheinungsbild auf eine ammoniumbetonte Injektionsdüngung, welches verbreitet als der so genannte „CULTAN-Effekt“ bezeichnet wird (Abb. 4): Die Blattfarbe ist deutlich intensiver, die Blätter zeigen eine steilere Stellung, die Halme sind kürzer und dicker, und die älteren Blätter und die Halmbasis sind länger grün als bei konventionell gedüngten Pflanzen. Sehr häufig erscheinen die Pflanzen gesünder und sind weniger von Pilzen befallen als konventionell gedüngte Getreidebestände. Elektronenmikroskopische Aufnahmen an Kohlrabiblättern haben gezeigt, dass die Wachsschicht nach einer NH_4 -Injektionsdüngung eine andere Struktur aufweist als die von konventionell gedüngten Pflanzen (BACHER 1999) Ob dies ursächlich für den häufig beobachteten niedrigeren Pilzbefall ist, ist bisher noch unklar.

In wieweit im Feld die N-Versorgung von der reinen Nitratversorgung hin zu einer Ammoniumernährung verschoben werden kann, hängt wahrscheinlich vom Witterungsverlauf ab. Nach einem kalten Frühjahr und einer hohen N-Nachlieferung während des Wachstums dürfte dies schlechter gelingen als bei niedrigem Nitratangebot aus dem Boden. Aus diesem Grund ist dieser Effekt nicht immer eindeutig erkennbar. SOMMER empfiehlt daher für Getreide einen späten Düngungstermin, damit zum Injektionszeitpunkt das Bodenprofil weitgehend nitratfrei ist.



Abb. 4: Habitus von Winterweizenpflanzen nach unterschiedlicher Düngung: links: ohne N-Düngung, Mitte: N-Düngung mit 3geteilter Harnstoffdüngung; rechts: Einmalige N-Injektion während der Bestockung mit Harnstoffammoniumsulfatlösung (beide: 150 kg N/ha)
(Foto Kücke)

2.3 Ökologische Aspekte

Es ist bekannt, dass Ammonium (NH_4^+) als positiv geladenes Kat-Ion im Boden nicht verlagert wird, da es von negativ geladenen Tonmineralen und Humusverbindungen gebunden wird. Allerdings wird Ammonium im Boden durch Nitrifikanten relativ schnell zu Nitrat oxidiert und kann nachfolgend bei abwärtsgerichteter Wasserbewegung als Nitrat ausgewaschen werden.

Vor diesem Hintergrund weist das CULTAN-Verfahren erhebliche Potentiale auf, die Nitratauswaschung zu reduzieren, bedingt durch (1) den Einsatz ammoniumhaltiger Dünger, deren Nitrifizierung durch die konzentrierte Ablage im Boden verzögert ist, (2) durch das Streben nach einem weitestgehend nitratfreien Bodenprofil und (3) der in vielen Fällen erkennbaren Möglichkeit, die N-Düngung ohne Ertrags- und Qualitätseinbußen reduzieren zu können.

Die wenigen bisher vorliegenden Untersuchungsergebnisse bestätigen diese Hypothese: In verschiedenen Trinkwasserschutzgebieten Baden-Württembergs

wurde die Nitratauswaschung mit Hilfe von speziellen Messeinrichtung (SIA-Systeme, KÖHLER et al. 2003) in konventionell mit Kalkammonsalpeter und nach dem CULTAN-Verfahren gedüngte Getreide- (Walter 2003) und Gemüseflächen (Köhler et al. 2003) mehrjährig gemessen. Die Versuchspartzen wurden dabei mit gleichen N-Mengen gedüngt. In beiden Untersuchungen wird über eine geringere Nitratauswaschung in den CULTAN-Parzellen berichtet. Im Gemüsebau betrug die Nitratauswaschung bei gleicher N-Düngung im Mittel der 3jährigen Untersuchung nach konventioneller Düngung 144 kg N/ha und Jahr, während sie in den CULTAN-Parzellen mit 98 kg N/ha um ein ca. ein Drittel niedriger war. In mehrjährigen Untersuchungen in Getreidekulturen fand WALTER (2003) je nach Standort und Jahr geringfügige bis erhebliche Verringerungen der Nitratauswaschung. Um zu verlässlichen Aussagen über eine durchschnittliche Minderung des Nitratauswaschungspotentials zu kommen, sind weitere Untersuchungen erforderlich.

Dass aus Ammonium- und Harnstoffdüngern Ammoniak freigesetzt werden kann, ist nicht neu, doch ist das Ausmaß von den jeweiligen Rahmenbedingungen abhängig. Flüssigdünger sind generell empfindlicher gegenüber Ammoniakfreisetzung als feste Dünger, und harnstoffhaltige Lösungen stärker als harnstofffreie. Gelangen harnstoffhaltige N-Lösungen auf Blattoberflächen und Mulchmaterial und werden sie nicht umgehend durch Niederschläge in den Boden gespült, dann wandeln die dort siedelnden Bakterien den Harnstoff innerhalb kürzester Zeit in Ammoniak um. Dadurch steigt der pH-Wert auf Werte über 8, und sämtliches in der Lösung befindliche Ammonium wird in Ammoniak umgewandelt und kann so gasförmig verloren gehen (KÜCKE und KÜNZEL 1999). Diese Sachverhalte verbieten die oberflächliche Ausbringung solcher N-Lösungen im Grünland und in Anbauverfahren mit Mulchsaaten. Wie aus Abb. 5 hervorgeht, lassen sich in Modellversuchen die Ammoniakverluste gegen Null reduzieren, wenn die N-Lösungen in den Boden injiziert werden. Diese Ergebnisse bestätigen Freilandmessungen aus den USA, die zu gleichen Schlussfolgerungen kommen (TERMAN 1979).

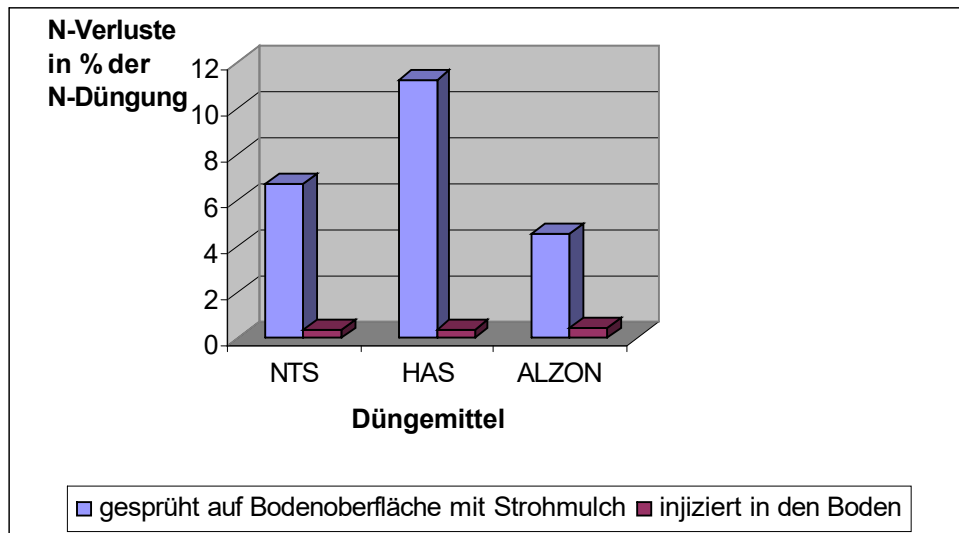


Abb. 5: Ammoniakverluste nach unterschiedlicher Flüssigdüngerapplikation

(Modellversuch, 190 mg N/Gefäß; NTS: 27 % Gesamt-N aus 13 Gew.% Harnstoff-N + 8 % Ammonium-N + 6 % Nitrat-N), 3 % S; HAS = Harnstoffammoniumsulfatlösung: 20 Gew.% N, aus 14 % Harnstoff-N + 6 % Ammonium-N), 6 % S; ALZON: 28 % Gesamt-N aus 14 % N Harnstoff-N + 7 % + Ammonium-N + 7 % Nitrat-N)

Abschwemmungsverluste, wie sie bei oberflächlicher Düngung auftreten können und nach Stickstoffdüngung besonders offensichtlich werden (Abb. 6), haben dazu geführt, dass nach der aktuellen Düngeverordnung Abstände zu Oberflächengewässern einzuhalten sind. Danach ist „beim Aufbringen von Stoffen ... mit wesentlichen Nährstoffgehalten ein direkter Eintrag in Gewässer dadurch zu vermeiden, dass für die Aufbringung an oberirdischen Gewässern ...“ folgende Abstände eingehalten werden: 1. grundsätzlich ein Abstand von mindestens drei Metern, 2. bei stark geneigten Flächen ... (Neigung > 5 °) ein Abstand von mindestens 10 m (§4 (3)). Auf Flächen, die eine Hangneigung von mehr als fünf Grad zu einem Gewässer aufweisen (stark geneigte Flächen) dürfen innerhalb eines Abstandes von 20 Metern zu einem Wasser führenden oberirdischen Gewässer auf Ackerflächen Düngemittel ... nur aufgebracht werden auf unbestelltes Ackerland bei sofortiger Einarbeitung (§3 (6)). Da nach Injektionsdüngung der N-Dünger nicht abschwemmgefährdet und die Injektion einer sofortigen Einarbeitung gleichgesetzt ist, müssen die vorgeschriebenen Abstände nicht eingehalten werden.



Abb. 6: Inhomogenität eines Getreidebestandes nach Abschwemmung des oberflächlich ausgebrachten N-Düngers (Foto: Felgentreu)

Es ist auch davon auszugehen, dass Auflagen der Düngeverordnung hinsichtlich des Einhaltens von Höchstgrenzen beim N-Bilanzüberschuss (2006-2008: \varnothing 90 kg N/ha; 2007 – 2009: \varnothing 80 kg N/ha; 2008 – 2010: \varnothing 70 kg N/ha; 2009 – 2011: \varnothing 60 kg N/ha) mit der N-Injektionsdüngung voraussichtlich eingehalten werden können.

2.4 Ökonomische Aspekte

Die Kosten für ein Sternrad-Injektionsgerät mit einer Arbeitsbreite von 12 m betragen 2005 in Deutschland etwa 100.000 €. Diese hohen Investitionen können i.d.R. nur bei einem überbetrieblichen Einsatz durch Maschinengemeinschaften oder Lohnunternehmer getragen werden. Die meisten Geräte werden daher bisher durch Lohnunternehmer betrieben. Die Kosten für die Düngerausbringungen werden zurzeit entweder je kg Nährstoffe oder als Ausbringungskosten je Fläche angegeben. Bei letzterem bewegen sich die Angaben in der Größenordnung von 29 – 35 €/ha + Düngemittelkosten + Mehrwertsteuer.

Betriebswirtschaftlich wird ein Landwirt die in seinem Betrieb anfallenden Kosten für die Düngung einschließlich seiner Maschinen- und Lohnkosten mit diesen Kostenvorgaben vergleichen müssen, um zu beurteilen, ob sich der Einsatz einer einmaligen Flüssigdünger-Injektionsdüngung lohnt.

Die steigenden Erdgas und Rohölpreise werden auch in Zukunft die Kosten für Treibstoffe und somit für die Düngemittelausbringung, aber auch für N-Dünger steigen lassen, da die N-Produktion sehr energieintensiv ist. Hinsichtlich der N-Düngung können diese steigenden Produktionskosten nur kompensiert werden durch geringeren N-Einsatz, verlustärmere und kostengünstige Ausbringung (z.B. durch Verringerung der Anzahl Überfahrten) und Steigerung der N-Ausnutzung (ausgedrückt in Kornmehrertrag pro kg gedüngtem N). Nach den bisher vorliegenden Untersuchungsergebnissen und Erfahrungsberichten lassen sich diese Effizienzparameter durch die N-Injektion steigern. Die Wirtschaftlichkeit der Injektionsdüngung wird sich zudem immer aus den Kosten für die Vergleichsverfahren ergeben.

Die Ausbringungskosten von pauschal 29,50 €/ha mit N-Kosten von zurzeit 72 Cent/kg (S-Bewertung 27 Cent/kg) im Vergleich zu 61 Cent bei AHL können durch N-Einsparungen und Arbeitskostenreduzierung der Düngung ausgeglichen werden. Das bisherige Fazit von Mensching-Buhr lautet, dass das CULTAN-Verfahren gegenüber der bisherigen Düngungspraxis zu gleichen Ertragsergebnissen, einer höheren N-Ausnutzung (niedrigere N_{\min} -Werte, niedrige N-Salden auf Schlagebene), gleicher Qualität, höherer Ertragsstabilität und einem vitaleren und gesünderen Bestandeseindruck führt.

2.5 Injektionsdüngung bei Mulch- und Direktsaat

Zu Verringerung von Bodenerosion, Oberflächenabfluss und Bodenverdichtungen werden zunehmend Mulchsaatsysteme eingesetzt. Eine Reihe von Besonderheiten unterscheidet die Wasser- und Nährstoffdynamik in solchen Anbausystemen von der mit wendender Bodenbearbeitung. Diese Besonderheiten prädestinieren die Injektionsdüngung für Mulchsysteme besonders und haben dazu geführt, dass in den Mulch- und Direktsaatflächen der kanadischen Prärie diese eine Standardmaßnahme darstellt: So kann bei hohen Mengen an Ernterückständen auf der Bodenoberfläche die Bodentemperatur leicht 3°C niedriger sein als in gepflügten Böden. Dies verringert die Diffusionsrate von Phosphat zur Wurzel und somit die Verfügbarkeit während der Jugendentwicklung (Murphy 1983). Weiterhin resultiert die höhere Bodendichte nicht gepflügter Böden in einem geringeren Porenvolumen, was den Eindringwiderstand für die Pflanzenwurzeln erhöht, die Sauerstoffdiffusion in den Boden reduziert und somit die atmungsabhängige Nährstoffaufnahme erschwert. Durch die geringere Sauerstoffzufuhr und die längeren Nässephasen ist von höheren Denitrifikationsverlusten auszugehen. Für die N-Versorgung ist zudem von Bedeutung, dass nicht gepflügte Böden im Frühjahr i.d.R. weniger N_{\min} enthalten als gepflügte Standorte.

Zudem ist lange bekannt, dass es in Anbausystemen mit nur flacher (Minimalbodenbearbeitung) oder ohne Bodenbearbeitung (zero tillage systems) zu Veränderungen der Nährstoffverteilung sowie der Humus- und pH-Gradienten im Bodenprofil kommt, da weder die Ernterückstände noch die Düngemittel durch wendende und mischende Einarbeitung gleichmäßig in den Pflughorizont eingearbeitet werden. Dadurch reichern sich die organische Substanz, P und K in den oberen Zentimetern an, während der pH-Wert in der oberen Bodenschicht abnimmt (Murphy 1983). Die an der Bodenoberfläche akkumulierten Nährstoffe sind naturgemäß bei oberflächlicher Austrocknung weniger pflanzenverfügbar als solche in tieferen, feuchten Bodenzonen.

Reduzierte Bodenbearbeitungsintensität führt bekanntlich auch zu einer höheren Makroporendichte im Boden. Makroporen ($\varnothing > 1 \text{ mm}$) werden entweder durch Schrumpfrisse (pedogene Makroporen) oder durch Bodentiere (biogene Makroporen) erzeugt (Abb. 7). Bei konservierender Bodenbearbeitung sind die größeren Regenwurmpopulationen für die deutlich erhöhte Zahl biogener, bis an die Bodenoberfläche reichenden Makroporen verantwortlich, die den gewünschten Effekt erzeugen, dass im Vergleich zu wendender Bodenbearbeitung weit mehr Niederschlagswasser im Boden versickern und somit nicht erosionswirksam werden kann.

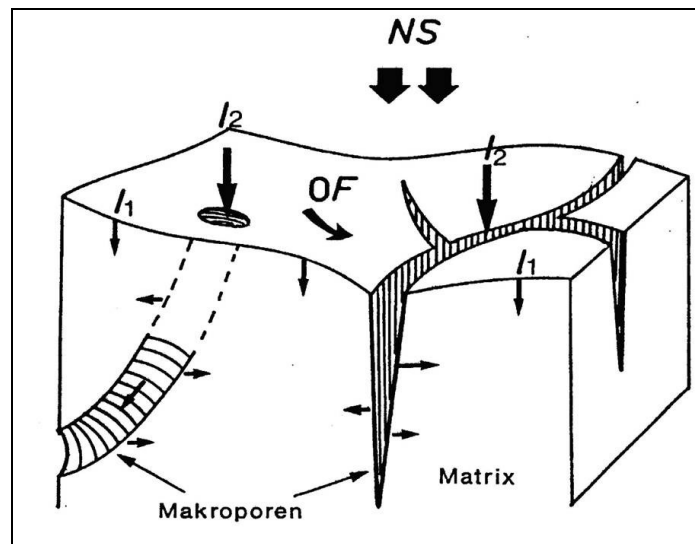


Abb. 7: Makroporensysteme und Wasserfluss

(NS = Niederschlag, OF = Oberflächenabfluss, I_1 = Wasserfluss durch die Bodenmatrix, I_2 = Wasserfluss durch Makroporen) (ADERHOLT 1995)

Nachteilig ist allerdings, dass nun sämtliche Stoffe auf der Bodenoberfläche in diese Makroporen gespült und dort schnell in tiefe Bodenschichten und ggf. in oberflächennahe Grund- und Dränwässer gelangen können, da das Sickerwasser die Bodenmatrix umfließt und diese Stoffe nicht mehr durch den Boden gefiltert oder durch dort lebende Mikroorganismen abgebaut werden. Dies betrifft auf die

Bodenoberfläche aufgebrachte Pflanzenschutzmittel und Düngemittel. Untersuchungen belegen die Tiefenverlagerung von Herbiziden (Aderholt 1995) und Nährstoffen wie Phosphat, die bei wendender Bodenbearbeitung kaum ausgewaschen werden. Hinzu kommt, dass Mulch- und Direktsaatsysteme aktuell nur mit einem erhöhten Herbizidaufwand erfolgreich zu betreiben sind. Bei der gängigen Düngepraxis in Systemen mit konservierender oder Minimalbodenbearbeitung ist somit das Risiko der Tiefenverlagerung oberflächlich applizierter Düngenährstoffe klar erhöht. Durch Injektion der Nährstoffe in die Bodenmatrix ist es nahe liegend, dass dieses Risiko verringert werden kann. Diesbezügliche Untersuchungen sind aber sehr aufwendig und stehen noch aus. Dass die Pflanzenverfügbarkeit der Düngenährstoffe durch Injektionsdüngung speziell unter solchen Anbaubedingungen erhöht wird, steht nach amerikanischen und kanadischen Versuchsergebnissen außer Frage.

3 Versuchsergebnisse

Die Ergebnisse des in Tab. 1 dargestellten Düngungsversuches mit Winterroggen zeigen eine von verschiedenen Versuchsanstellern und Praktikern gemachte Beobachtung bei Getreide: Mit der Injektionsdüngung ist es vielfach möglich, mit einer reduzierten N-Düngung (hier 125 kg N/ha) das gleiche oder gar ein höheres Ertragsniveau zu realisieren wie mit gesplitteten N-Applikationen in ortsüblicher Höhe (hier 150 kg N/ha). Diese Ertrags- und Düngereinsparungseffekte sind nicht in jedem Einzelversuch erkennbar, zeigen sich aber im Mittel mehrerer Versuchsjahre (WALTER 2003).

Nach mehrjährigen Feldversuchen mit Kartoffeln kommt BECK (2004) zu dem Ergebnis, dass die Ertragsvorteile nach Injektionsdüngung mit abnehmender Düngungsintensität gegenüber der konventionellen Düngung kontinuierlich zunehmen. Die Effizienzvorteile der Injektionsdüngung kommen somit unter Bedingungen, in denen die N-Düngungshöhe begrenzt ist (z.B. Trinkwasserschutzgebiete), besonders zum Tragen. Die Ergebnisse von BECK lassen auch den Schluss zu, dass unter Anbaubedingungen mit teilweisem Wasserstress die Injektionsdüngung das ideale Düngeverfahren für Kartoffeln darstellt. Über Beobachtungen, dass nach Injektionsdüngung auch andere Kulturarten in Trockenphasen weniger Dürrestresssymptome aufweisen, wird häufig berichtet. Diesbezügliche Untersuchungen zum Wasserverbrauch bei unterschiedlicher N-Düngung laufen zurzeit in der FAL.

Tab. 1: Ertragsaufbau von Winterroggen bei unterschiedlicher N-Düngung und Applikation (Kücke 2003, zusammen mit der ATB Lindau und der AgriCO Lindau)

(kg N/ha)	N 0	N oberfl. 125	N oberfl. 150	N Inj. 125	N Inj. 150
Kornertrag (dt/ha) bei 14,5% Feuchte	76,0 93 %	80,5 ^a 99 %	81,7 ^a 100 %	84,1 ^a 103 %	86,4 ^{a,*} 106 %
Anzahl Ähren / m ²	531	596	619	646	703 ^a
TKG (g) bei 14,5% Feuchte	30,8	28,5	28,0	29,0	28,2
Kornzahl / Ähre	48,3	51,6	59,1 [*]	50,1 ^a	53,5
Strohertrag TM (dt/ha)	60,3	66,0	73,0	72,2	72,5
% N im Korn	1,53	1,84 ^{a*}	1,97 ^a	1,85 ^{a*}	1,98 ^a
% N im Stroh	0,48	0,72 ^a	0,68 ^a	0,66	0,68 ^a
Fallzahl (sek.)	341	353	348	337	346

* = sign. zu betriebsüblich (150 kg N/ha oberflächlich) bei p < 5%

^a = signifikant zu Düngung 0 bei p < 5 %

Bei Zuckerrüben wurde in mehrjährigen Feldversuchen der Arbeitsgemeinschaft für Versuchswesen und Beratung im Zuckerrübenanbau in Hessen und Rheinland-Pfalz und der staatlichen Lehr- und Versuchsanstalt Oppenheim im Vergleich zur breitwürfigen N-Düngung mit KAS mit einer AHL-Injektion zur Saat und zum 6 -8 - Blattstadium der optimale Rübenenertrag bzw. bereinigte Zuckergehalt bei einem deutlich geringeren N-Aufwand als mit KAS-Düngung erzielt. (~ - 40 kg N/ha) (WEIMAR 2003). Feldversuche des Instituts für Zuckerrübenforschung Göttingen, der ARGE Nord und des Instituts für Pflanzenbau und Grünlandwirtschaft der FAL an verschiedenen Standorten, mit unterschiedlichen N-Lösungen sowie mit unterschiedlicher Applikationstechnik (Sternrad, Injektionsschar) ergaben keine Ertrags- und Qualitätsunterschiede zwischen zweigeteilter Kalkammon-Salpeterdüngung und der Injektion mit Ammonitratharnstofflösung oder Harnstoffammoniumsulfatlösung (KOCH et al. 2006). Je nach Reihenabständen der Rüben kann es zum Überfahren der Rübenreihen kommen, und gleiche Abstände zwischen den Rübenreihen zu den Injektionsreihen sind technisch nicht selten einhaltbar. Schäden an den Pflanzen und Ertrags- und Qualitätsbeeinflussungen waren aber nicht zu erkennen. Verschiedene Anwender umgehen das Problem des Überrollens von Rübenreihen durch die Injektion quer zur Drillrichtung.

Die vorliegenden Feldversuchsdaten zu Winterraps weisen überwiegend keine Ertrags- und Qualitätsunterschiede zwischen geteilter KAS-Düngung und einmaliger Injektionsdüngung auf (BOELKE 2003, FELGENTREU 2003), gelegentlich werden Einkürzungseffekte und eine damit verbundene geringere Lagerneigung beobachtet. Befürchtungen, nach denen Blattbeschädigungen durch das Überfahren mit den Sternrädern zu einem stärkeren Krankheitsbefall führen, sind eindeutig nicht zu bestätigen (FELGENTREU 2003). Raps ist neben Futtergras und Grünland nach den

bisher vorliegenden Erfahrungen die einzige Ackerkultur, bei der eine Injektion im Spätherbst und Winter erfolgreich durchgeführt wird.

In Gemüsekulturen wird Flüssigdüngerplatzierung ebenfalls erfolgreich durchgeführt (SCHUMACHER 2003), zumeist als Bandablage neben den Pflanzballen. Erträge und Qualitäten sind nach SCHUMACHER (2003) mindestens so hoch wie die konventionell gedüngter Pflanzen, wobei Gemüse nach Ammoniumplatzierung meist deutlich niedrigere Nitratgehalte aufweist. Vor dem Hintergrund der regelmäßig auf EU-Ebene geführten Diskussionen um hohe Nitratgehalte in verschiedenen Gemüsearten (z.B. Spinat, Rucola) ist es verwunderlich, dass diese einfache Düngungsstrategie speziell zum Erreichen dieses Qualitätsziels national und EU-weit kaum zur Kenntnis genommen oder empfohlen und gefördert wird, zumal die publizierten N_{\min} -Untersuchungen nach der Ernte häufig niedrigere Nitratgehalte im Bodenprofil aufweisen und auch im Freilandgemüseanbau eine deutliche Verringerung der Nitratauswaschung bei gleichem Düngungs-, Ertrags- und Qualitätsniveau möglich erscheint (KÖHLER et al. 2003). Zudem sind auch hier Potentiale zur Senkung des Düngenspiegels erkennbar. So verbleibt nach starken Niederschlägen nach dem Düngen der Ammoniumstickstoff im Bereich des Wurzelballens, wohingegen nach einer konventionellen Oberflächendüngung der Nitratstickstoff in so tiefe Bodenschichten verlagert sein kann, dass nachgedüngt werden muss. Diese Aspekte sprechen für die Arbeitswirtschaft und die Effizienz.

Ein weiterer positiver Begleiteffekt, der in Reihenkulturen wie Kartoffeln und Gemüse zu beobachten ist, ist ein geringeres Unkrautwachstum. Während nach gleichförmiger Oberflächendüngung die Nährstoffe nicht nur das Wachstum der Kulturpflanzen, sondern auch das der Unkräuter fördert, erreichen nach Ammoniumplatzierung zahlreiche Unkräuter das Düngedepot nicht und leiden erkennbar unter Stickstoffmangel.

Versuchsdaten zum Einsatz der Ammonium-Injektionsdüngung im Grünland liegen bisher nicht vor, und Fragen nach den optimalen Injektionsterminen, der Höhe der Einzelgaben, der Kombination mit Gülle, der Futterqualität und der Siliereigenschaften können bisher nicht mit Zahlen beantwortet werden.

3.1 Erfahrungen aus der Praxis

Aus den wenigen bisher vorliegenden Exaktversuchen lassen sich kaum allgemeingültige Düngungsempfehlungen hinsichtlich des pflanzenartsspezifisch optimalen Injektionszeitpunktes, des Bodens, des Klimas und der Eignung der unterschiedlichen am Markt verfügbaren N-Lösungen ableiten, zumal solchen Empfehlungen auch mehrjährige Düngungsversuche zugrunde liegen sollten.

Interessierte Landwirte sind daher auf Praxiserfahrungen angewiesen, wenn sie ihre Düngung auf das Injektionsverfahren umstellen wollen.

Mehrjährige Erfahrungen mit der Injektionsdüngung haben im norddeutschen Raum die ppm Agrarberatung sowie die Landwirtschaftliche Unternehmensberatung Uelzen gesammelt. Im Raum Uelzen wird die Injektionsdüngung mit dem Sternradinjektor seit 2003 und mit NTS-Lösung (27N/3S) mit guten Erfolgen und mit Betreuung von Frau Alix Mensching-Buhr durchgeführt. Seit dem hat sich nach Auskunft von Frau Alix Mensching-Buhr die nach diesem Verfahren gedüngte Ackerfläche von 600 ha bis mittlerweile 1200 ha erhöht. Auslösender Faktor für die Landwirte sind überwiegend arbeitswirtschaftliche Vorteile. Die Fruchtfolgen beinhalten Kartoffeln, Zuckerrüben, Qualitätsweizen, Futterweizen, Wintergerste und Braugerste. Winterroggen und Triticale sind wenig vertreten. Vorrangig wird das Verfahren dort bisher zu Wintergetreide eingesetzt. Die von SOMMER empfohlene späte Injektion nach Einsetzen eines latenten N-Mangels bis zum Schossen wird nicht abgewartet, was nicht erkennbar zu Nachteilen bei Ertrag und Qualität geführt hat. Bewährt haben sich in Niedersachsen nach den Erfahrungen der Landberatung Uelzen und der ppm Agrarberatung die in Tab. 2 angegebenen Injektionstermine.

Tab. 2: Erfahrungen zum Injektionstermin aus praktischen Beobachtungen

Kultur	Landberatung Uelzen	Ppm Agrarberatung
Winterroggen	Vegetationsbeginn – Mitte Bestockung (Ende März)	Vegetationsbeginn bis Ende Bestockung
Wintergerste	Vegetationsbeginn – Mitte Bestockung (Ende März)	Vegetationsbeginn bis Ende Bestockung
Winterweizen	Vegetationsbeginn bis Schossbeginn (Mitte April)	Vegetationsbeginn bis Schossbeginn
Triticale	Vegetationsbeginn bis Schossbeginn (Mitte April)	Vegetationsbeginn bis Ende Bestockung
Sommergerste	Direkt nach der Saat bis EC 12, um Fahrschäden zu vermeiden	Bis Mitte Bestockung
Mais	Zur Saat bis zum 6-Blattstadium	Zur Saat bis 4-Blatt Stadium
Zuckerrüben	Gleich nach der Saat; bei Einsatz im 2-4-Blattstadium kam es zu Fahrschäden, die allerdings nicht erkennbar ertrags- und qualitätsrelevant waren	Zur Saat
Raps	Vegetationsbeginn (Ende Februar bis Anfang März)	Beginn bis Ende der Vegetationsruhe
Grünland		6 Wochen vor dem 1. Schnitt

Die Herbstinjektion (Mitte November) zu Raps wurde nur auf Lehmböden (uL) mit Ackerzahlen (AZ) > 60 getestet und hat sehr gut funktioniert. Dagegen sind Versuche zur Herbstinjektion zu Winterweizen auf anlehmigen Sanden (IS) mit AZ 30 fehlgeschlagen, da die Depots nicht stabil genug waren und im Frühjahr der Stickstoff in die Tiefe verlagert war.

3.1.1 Kartoffeln

Die Düngung der Kartoffeln nach dem „CULTAN“-Verfahren kann auf zwei Arten durchgeführt werden: Beim Pflanzen der Knollen oder beim Häufeln der Dämme.

Beim Pflanzen der Knollen wird direkt vor dem Furchenzieher ein Injektionsschar angebaut, welches 10 bis 15 cm unter der Pflanzknolle ein Liniendepot aus Ammoniumsulfat ausbringt.

Alternativ kann der N-Dünger auch beim Häufeln der Dämme ausgebracht werden, wobei das Düngerband so nahe wie möglich an den Legedamm abgelegt werden soll (etwa 7 cm seitlich von der Pflanzknolle und etwa 7 bis 10 cm tiefer als die Pflanzknolle). Bei dieser Variante ist sichergestellt, dass es nicht zum Verschieben und Verrollen der Knollen im Damm kam.



Abb. 8: Konzept Düngung beim Legen



Abb. 9: Position Injektion vor dem Furchenzieher



Abb. 10: Konzept Injektion beim Häufeln



Abb. 11: Position Injektionsschar im Häufelgerät

Auswertungen von Versuchen mit frühen, vorgekeimten Verarbeitungssorten bis hin zu späten Lagersorten zeigen, dass die nach dem „CULTAN“-Verfahren gedüngten Kartoffeln ertraglich bis zu 10 % über den mit Kalkammonsalpeter gedüngten Kartoffeln liegen. Eine um 20 % reduzierte Höhe der N-Gabe erbringt beim CULTAN-Verfahren den gleichen Ertrag wie Kalkammonsalpeter in üblicher Höhe. Auch die Größensortierung der Knollen fällt bei den Ammonium ernährten Varianten zu Gunsten größerer Knollen aus, bei gleichem bis leicht höherem Stärkegehalt. Hohlherzigkeit der Knollen, die oft bei Kalkammonsalpeter gedüngten Kartoffeln beobachtet wird, tritt bei der „CULTAN“-Düngung kaum auf. Der Verlauf der Abreife ist bei den nach dem „CULTAN“-Verfahren gedüngten Kartoffeln harmonischer und gleichmäßiger als bei konventionell gedüngten.

Das Phänomen der höheren Toleranz gegenüber Trockenstress und Pflanzenkrankheiten bei Ammoniumernährung, auf das bei den oben genannten Kulturen hingewiesen wurde, kann auch für die Kartoffeln bestätigt werden.

Mit dem Sternradeinsatz zu Kartoffeln wird aktuell experimentiert (Abb. 12). Technisch scheint es möglich, mit um 45° gedrehten Rädern in den bepflanzten Damm vor dem Häufeln zu injizieren, doch sind diesbezüglich noch keine abschließenden Aussagen möglich. Das Depot hatte den erforderlichen Abstand von 10-12 cm von der Knolle, um die Toxizität der NTS-Lösung auf die Pflanzknolle auszuschließen. Eine Injektion vor dem Pflanzen ist nicht akzeptabel, da dann die Depots beim Pflanzen und Häufeln zerstört würden.



Abb. 12: Einsatz des Injektionsgerätes zur Injektion in Kartoffeldämme mit 45° geneigten Sternrädern

(Foto: Kahnert, Maschinen- und Antriebstechnik GmbH, Güstrow)

Im Dürrejahr 2003 zeigten sich die Vorteile des Injektionsverfahrens gegenüber der geteilten Düngung, sei es mit AHL oder KAS deutlich. Die Injektionsstreifen wurden zwar später gedüngt, holten aber innerhalb von 10-14 Tagen in der Bestandesentwicklung und vor allem in der Grünfärbung auf. Der Fungizid- und Wachstumsreglereinsatz erfolgte gleich. Die injizierten Getreidebestände hatten größere Fahnenblätter, eine intensivere Grünfärbung, die auch länger anhielt, und eine andere Blattstellung. Der Wuchstyp der gleichen Sorte war verändert (s. Abb. 4).

3.1.2 Zuckerrüben

Werden Zuckerrüben nach dem „CULTAN“-Verfahren angebaut, so sollten folgende pflanzenbauliche Schritte durchgeführt werden:

- Anbauverfahren im Mulchsaatverfahren, Strohdüngung mit anschließender Grundbodenbearbeitung im Sommer
- Im Frühjahr flache Saatbettbearbeitung nachdem die Altverunkrautung mit einem Totalherbizid bekämpft wurde

Die Düngung nach dem „CULTAN“-Verfahren erfolgt zum 6-8 Blattstadium der Zuckerrüben, meistens vor Abschluss der 3.NAK, damit der Herbizidfilm, der durch die Injektionsräder punktuell zerstört wird, mit der Abschluss-spritzung wieder hergestellt wird. Die Injektion der Ammonium-Depots erfolgt in jeder zweiten Saatzzwischenreihe.

Hierdurch wird erreicht, dass im Vergleich zu Liniendepots oder Depots zwischen jeder Reihe Depots mit einer hohen NH_4^+ -Konzentration und einer relativ geringen Oberfläche angelegt werden. Hierdurch wird erreicht, dass das Depot über einen längeren Zeitraum hinweg stabilisiert wird, d.h. die Umwandlung von Ammonium in Nitrat kann auf diese Weise länger hinausgezögert werden. Des Weiteren werden die Depots von beiden Seiten her durch die Pflanzenwurzeln stabilisiert. Gleichzeitig wird die Beschädigung des Herbizidfilms so auf ein Minimum reduziert.

Eventuell sollte, da bei einer Düngung nach dem „CULTAN“-Verfahren sich das Spross/Wurzel-Verhältnis gegenüber konventioneller Nitraternahrung mehr zur wurzeldominanten Pflanze entwickelt, bei den bodenaktiven Wirkstoffen Metamitron, Ethofumesat, Quinmerac und Chloridazon die Aufwandmenge um 10 % gegenüber konventionell angehoben werden, da der Boden weniger beschattet wird und es somit wichtiger wird, den Boden ausreichend gegen Spätverunkrautung zu versiegeln.

Bei der Aussaat der Zuckerrüben sollte über die Saatreihe eine Stickstoffstartgabe von ca. 20 bis 30 kg N/ha nach Möglichkeit in Form eines Bandes verabreicht werden, damit den jungen Pflanzen bis zum Heranwachsen an das Ammonium-Depots ausreichend Stickstoff zur Verfügung steht. Aus arbeitswirtschaftlichen Gründen kann eventuell gleichzeitig eine Phosphatdüngung mitausgebracht werden. Aus den Erfahrungen des Jahres 2004 kann abgeleitet werden, dass die Startgabe über die Saatreihe für eine zügige Jugendentwicklung und das Erwachsen der Depots äußerst wichtig ist. Besonders auf nachlieferungsarmen Rekultivierungsstandorten verloren die Zuckerrüben 3 bis 5 Wochen Vegetationszeit, bis sie die Depots erwachsen hatten und wieder ausreichend mit Stickstoff versorgt waren.

Weiterdem lässt sich feststellen, dass die Stickstoffdüngermenge je Hektar bei einer Düngung nach dem „CULTAN“-Verfahren gegenüber konventionell um 10 % reduziert werden kann, was in der höheren Düngereffizienz begründet ist. Somit wird gleichzeitig auch sichergestellt, dass die Zuckerrüben zum Zeitpunkt der Ernte ausreichend ausgereift sind, mit positivem Einfluss auf den Zuckergehalt und die innere Qualität (Saftreinheit Amino-N).

Es konnte beobachtet werden, dass die Zuckerrüben, die nach dem „CULTAN“-Verfahren gedüngt waren, gegenüber konventioneller Düngung deutlich später die Schwelle in der Cercospora Bekämpfung erreichten und teilweise gar keine Bekämpfung erforderlich war.

Auch die Welke des Blattapparates konnte bei einer Düngung nach dem „CULTAN“-Verfahren erst 3-5 Tage später festgestellt werden als bei herkömmlich gedüngten Pflanzen.

In Zuckerrüben zeigte sich ein verringerter Wasserstress, wobei die Beregnung trotzdem überall flächendeckend zum Einsatz kam. Im Folgejahr 2004 bei Niederschlagsüberangebot konnte zum Wasserstress nichts festgestellt werden, doch das gesünder aussehende Erscheinungsbild nach NTS-Injektion blieb deutlich im Vergleich zu oberflächlich gedüngten Beständen. Die gedüngten N-Mengen wurden in praxisüblicher Höhe gewählt.

Die Erfahrungen mit Zuckerrüben im Raum Uelzen sind ebenfalls gut, wobei die festgestellten Ertragszuwächse von 3-4 dt BZE/ha (Brutto-Zucker-Ertrag) auch normale Schlagvariabilität darstellen können. Winterraps eignet sich vorzüglich für die Injektion, um unnötige Überfahrten zu sparen und schon früh die nötige Schwefelmenge anzubieten. Die Herbstinjektion ist aus Auslastungsgründen für die Verfahrensanbieter besonders interessant. Wenn eine technische Lösung für den Kartoffelbau gefunden wird, wäre es erstmals möglich, die gesamte Fruchtfolge mit Injektion zu fahren. So könnten weitergehende in der Literatur beschriebene Vorteile wie das Aushungern von Unkräutern an der Bodenoberfläche realisiert werden.

3.1.3 Getreide

Der Termin der Düngung des Winterweizens sollte nahe an das Ende der Bestockung des Weizens gelegt werden (EC 30), um eine zu hohe Triebzahl je Pflanze zu vermeiden. Ein genereller Termin kann jedoch wegen des Sorteneinflusses und der Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Aussaat empfohlen werden. Bei der Sorte Hattrick, eine Sorte aus der Ritmo Familie, die schon recht zeitig die Bestockung abschließt, soll auch bereits früh mit der Düngerinjektion begonnen werden. Spätsaaten (Saattermin im Dezember), die im Frühjahr eine geringe Bestandsdichte aufweisen, sollten zeitig vor dem Ende der Bestockung

gedüngt werden. In ausreichend entwickelten Weizenbeständen sollte ein Düngungstermin kurz vor EC 31 gewählt werden.

Ertraglich liegt der nach dem „CULTAN“-Verfahren gedüngte Weizen auf den besseren Standorten, d.h. Blattfrucht als Vorfrucht, Standorte über 75 Bodenpunkte und Saattermin zwischen Oktober und November, auf dem gleichen Niveau wie der konventionell gedüngte Weizen. Auf den schlechteren Standorten, besonders den Standorten mit einer schlechteren Wasserführung liegt der Ertrag des mit Ammonium ernährten Weizens ca. 10 % höher. In Monaten mit Temperaturen von über 30°C, hoher Strahlung und ohne nennenswerte Niederschläge können bei Nitrat ernährtem Weizen physiologische Stresssymptome, wie etwa Sonnenflecken, Aufhellungen des Fahnenblattes und Blattrollen des Fahnenblattes beobachtet werden. Außerdem vertrockneten die Blätter F-1 und F-2 völlig. Im „CULTAN“ gedüngten Weizen ließ sich dies erst später und nicht in einem solchen Ausmaß beobachten.

Mehltaubefall setzt teilweise gar nicht oder erst zwei Wochen später ein, sodass teilweise 3malige Pflanzenschutzmaßnahmen auf 2malige reduziert werden können.

Bei der Wintergerste lässt sich beobachten, dass die nach dem „CULTAN“-Verfahren gedüngte Gerste 3-4 kräftig entwickelte Triebe zeigt, wohingegen die konventionell mit Kalkammonsalpeter gedüngte Gerste 4 mäßig entwickelte Triebe und ebenfalls genauso viele unproduktive Nebentriebe aufweist. Derartige Nebentriebe sind bei der nach dem „CULTAN“-Verfahren gedüngten Gerste nicht zu finden. Des weiteren erweisen sich die Stängel und Blätter der mit Ammonium ernährten Gerste kräftig, stabil und fast bis an die Basis grün und physiologisch vital, während bei Nitrat-Ernährung die Blätter und Stängel zur Wurzel hin labil und gelblich erscheinen.



„CULTAN“

Kalkammonsalpeter

Im Verlauf des Frühjahres lässt sich weiter beobachten, dass Krankheiten wie etwa Netzflecken deutlich später in der „CULTAN“ gedüngten Gerste in Erscheinung treten und auch die Schadschwelle etwa 2 Wochen später gegenüber konventionell überschritten wird. Ab Beginn des Ährenschiebens kann festgestellt werden, dass bei der nach dem „CULTAN“-Verfahren gedüngten Gerste die Ähren länger und die Körner dicker und besser ausgebildet sind. Diese augenscheinlichen Beobachtungen führen zu einem Mehrertrag von etwa 10 %.



links Kalkammonsalpeter

rechts „CULTAN“

Folgende N-Mengen (kg N/ha) sind bisher im Raum Uelzen zum Einsatz gekommen: Wintergerste 130-160, Triticale 140-160, Winterweizen 140-170 bei geplanter Ährennachdüngung, 160-190 ohne N-Ährengabenplanung, Winterroggen 120, Sommerbraugerste 70-100 (100 erscheint risikoreich, wird aber durch Beregnungseinsatz abgesichert), Winterraps: 170-200, Zuckerrüben 100-140.

Ertragssteigerungen konnten in Uelzen bei praxisüblicher N-Menge nicht festgestellt werden. Die Ertragsaufzeichnungen lassen nach Mensching-Buhr aber eine deutlich höhere Ertragssicherheit erkennen, vor allem auf den leichten bis mittleren Standorten. Tendenziell zeichnet sich ab, dass das mit gesplitteter N-Düngung erzielbare Ertragsniveau bei Injektionsdüngung mit einer um 15-20 % verringerten N-Menge erreicht werden kann. Gerste, Roggen, Triticale und Futterweizen hatten keine Qualitätsprobleme, auch die Braugerste nicht. Qualitätsweizen konnte vereinzelt durch zusätzliche Ährengaben im Proteingehalt gesteigert werden, was intensiv diskutiert wurde. Mensching-Buhr beobachtete, dass die Proteingehalte im Korn nach Injektionsdüngung in Abhängigkeit von Sorte und Ertragsniveau ebenso

variabel sind, wie man es bisher aus der geteilten oberflächigen Düngung kennt (Verdünnungseffekt bei hohem Ertragsniveau).

Um das möglicherweise schon verbrauchte Depot zum Zeitpunkt der Ährengabe erfassen zu können, beprobte Frau Mensching-Buhr erstmals 2005 mit dünnen Bohrstöcken (Grundnährstoffprobenahme) den Boden an und zwischen den Injektionsstellen und untersuchte diese Proben auf ihren Nitrat- und Ammoniumgehalt. So können Konzentrationsunterschiede im Boden mit und ohne Depot gemessen werden. Besonders die Ammoniumgehalte zeigen dann an, ob noch verfügbarer Stickstoff im Depot vorhanden ist. Mit dieser Vorgehensweise konnten 2005 gezielte Empfehlungen zur Nachdüngung des Weizens, teilweise auch der Gerste gegeben werden. Zudem erhält der Praktiker einen Einblick in den Verbrauchszustand des Depots. In einem Winterweizenversuch 2004 wurde der Rohproteingehalt im Korn durch die Nachdüngung mit 20 bzw. 40 kg N als KAS um max. 0,5 Prozentpunkte gesteigert. Der Versuch bestätigte das Grundprinzip der CULTAN-Ernährung, die keinen Luxuskonsum der Pflanze ermöglicht. Nach langjährigen Erfahrungen mit der geteilten Düngung, die unterstützt durch Chlorophyllmessungen, Nitrachek etc. variiert werden kann, fällt es den Praktikern zuerst schwer, die gesamte N-Menge vorab ohne Berücksichtigung der Wachstumsbedingungen festzulegen. Die Erfahrungen im Getreide in Uelzen zeigen deutlich, (1) dass das System gut funktioniert, (2) dass N-Einsparungen bei gleichem Ertragsniveau möglich sind, (3) dass eine größere Sicherheit gerade auf leichten Standorten besteht, und (4) dass der eingesetzte Stickstoff in Ertrag umgesetzt werden kann (Ertragssicherheit).

3.1.4 Feldgras

Konventionell wird zu jedem Schnitt Stickstoff in Form von Kalkammonsalpeter oder als Kombinationen von Kalkammonsalpeter und Gülle gedüngt. Somit ergeben sich bei 5 maliger Schnittnutzung mindestens 5 Überfahrten. Mit dem „CULTAN“-Verfahren lässt sich dies auf 2 bis maximal 3 Überfahrten reduzieren. Im Falle von 5 geplanten Schnitten soll hierbei die 1. Gabe (50 % der gesamten N-Menge) etwa ab Ende Januar bis Anfang März und die restlichen 50 % nach dem 1. Schnitt appliziert werden. Werden 6 Schnitte geplant, wird empfohlen im Zeitraum von Ende Januar bis Anfang März 33 % der gesamten N-Menge, nach dem 1. Schnitt weitere 50 % und nach dem 2. Schnitt den Rest auszubringen.

Im Vergleich zur breitwürfigen Kalkammonsalpeter-Düngung lässt sich bei der Ammoniuminjektionsdüngung eine deutlich schnellere und bessere N-Wirkung erkennen. Besonders nach dem 1. und 2. Schnitt, wenn die Grasnarbe im trockenen Frühsommer austrocknet, zeigt die Düngung mit Kalkammonsalpeter bis zum Einsetzen von Niederschlägen kaum eine Wirkung.

Auch eine Überdüngung mit Stickstoff, wie sie sich bei konventioneller Düngung mit hohen NO_3 -Gehalten im Aufwuchs niederschlägt, kann bei einer Düngung nach dem „CULTAN“-Verfahren nicht festgestellt werden. In einem Streifenversuch, in dem 220 kg N/ha in Form von Ammoniumsulfat in den Boden injiziert wurden, lagen die NO_3 -Gehalte niedriger als bei 100 kg N als Kalkammonsalpeter pro ha breit verteilt. Weiterdem zeigen Futteranalysen in nach dem „CULTAN“-Verfahren gedüngten Futterbeständen höhere Eiweißgehalte und höhere NEL-Werte gegenüber konventionell gedüngtem Futter. Dies trifft auch auf Betriebe mit Ganzpflanzensilage (GPS) zu.

Ertraglich kann das nach dem „CULTAN“-Verfahren gedüngte Gras gegenüber dem konventionell gedüngtem Gras überzeugen, was für alle Schnitttermine zutrifft.

Auch ein Befall mit Mehltau und Rost, welcher ab dem 3. Schnitt in konventionell gedüngtem Gras häufig zu beobachten war, war in dem mit Ammonium ernährtem Gras nicht festzustellen. Dies ist auch als ein Kriterium für eine bessere Schmackhaftigkeit anzusehen.



links „CULTAN“-Verfahren

rechts Kalkammonsalpeter

Nach Ansicht von Bommers bietet das CULTAN-Verfahren der landwirtschaftlichen Praxis zahlreiche Vorteile bei der Arbeitswirtschaft und der Betriebsmittelreduzierung. Er hält durch Reduzierungen der N-Gesamtdüngermengen und die einmalige Ausbringung Spielräume von 20,- bis 30,- €/ha für möglich, die sich noch erhöhen, wenn Injektionsdüngung und pfluglose Bodenbearbeitung kombiniert werden.

Die aktuelle Diskussion über die einmalige Ausbringung von Flüssigdüngern über Schleppschläuche und sogar über Mehrlochdüsen wird sehr kritisch gesehen. Nach den Erfahrungen von Bommès kann die Düngung mit Schleppschläuchen einen praktikablen Einstieg in das Verfahren darstellen, wenn gewisse Rahmenbedingungen beachtet werden, um ein stabiles Depot einzustellen (BOMMÈS 2006):

- Nur Anwendung in Kulturen mit kurzer Wachstumsperiode zwischen Bestockungsende und Fahnenblattschieben (Sommergetreide, Wintergerste)
- Keine Ausbringung in hängigem Gelände, da durch Niederschläge das Düngerband abgeschwemmt und somit das Depot im Boden zerstört wird
- Keine frühzeitige Depotanlage, da Diffusion des Düngers im Boden die Angriffsfläche im Boden erhöhen
- Einsatz im Raps ist mit großen Unsicherheiten behaftet
- Kein Einsatz im Grünland möglich

Mehrlochdüsen sind seiner Ansicht nach dagegen unter keinen Umständen in der Lage, längerfristig stabile Depots anzulegen. Er sieht durch diese Empfehlung und die in dieser Form bereits praktizierte N-Ausbringung auf die Betriebe in naher Zukunft die Probleme erhöhter Nitratauswaschung durch massive Schubeffekte (priming effect) zukommen, die man in seinem Beratungsgebiet derzeit in den Griff zu bekommen versucht.

4 Fazit

In Deutschland wird die Injektionsdüngung selten von der Officialberatung propagiert, da es bislang nur wenige Versuchsberichte zu den in Deutschland angebaute Kulturarten gibt. Im Vergleich zu Düngestrategien, bei denen Festdünger oder Flüssigdünger über Feldspritze oder Schleppschläuche ausgebracht werden und bei denen die verfügbare Technik die Anlage von mehrjährigen Versuchsanlagen erlaubt, war die Technik, die für Parzellenversuche zur Verfügung stand, bisher primitiv, vielfach selbst gebaut oder umgebaut und entsprechend mit technischen Dosierproblemen behaftet. Die Überprüfung einer auf Flüssigdünger-Injektion basierenden Düngestrategie wie dem CULTAN-Verfahren war daher bisher durch die Officialberatung nicht möglich.

Die bisher vorliegenden Versuchsdaten zu den wichtigsten Ackerkulturen zeigen, dass in der Mehrzahl der Fälle mit der Flüssigdüngerinjektion Ertrags- und Qualitätsgleichheit erreicht wird, in vielen Fällen auch Mehrerträge erreicht werden

und dass Mindererträge gegenüber den bisherigen Düngungsstrategien eine sehr seltene Ausnahme darstellen.

(1) Untersuchungen der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen kommen bei konventionellen Düngungsstrategien zu dem Schluss, dass Jahreseffekte nur einen geringen Einfluss auf die Höhe der optimalen N-Düngung haben (JACOBS 2005). Das heißt, dass der Praktiker wenige Möglichkeiten hat, während der Vegetation den Bestand noch über eine Korrektur der N-Düngung zu steuern. Zudem ist der Kornhöchstertrag nicht der wirtschaftliche Höchstertrag, und auf letzteren muss es dem Praktiker letztendlich ankommen. Dieser ökonomische Höchstertrag sinkt mit jeder Überfahrt. Zwischen dem Höchstertrag und dem wirtschaftlichen Höchstertrag von Winterweizen wurde von JACOBS (2005) ein Ertragsunterschied von 14,5 dt/ha ermittelt. Vor dem Hintergrund der dargestellten Ertragsgleichheit ist die vielfach geführte Diskussion, ob ggf. doch mit einer 3 – 4 mal gesplitteten Düngung gelegentlich ein höherer Kornertrag im Vergleich zu einer einmaligen Injektionsdüngung erzielt werden kann, unverständlich: Unter der Voraussetzung gleicher Kosten für N und für die Ausbringung ist die Injektionsdüngung bei gleichem Ertragsniveau ökonomisch allen N-Düngungsstrategien mit Teilgaben eindeutig überlegen. Ein ökonomischer Mehrertrag stellt sich bei gleichem Erlös somit zwangsläufig für die Düngestrategie mit den niedrigeren N-Ausbringkosten (Preis je kg N + Ausbringkosten (Maschinen, Personal, Betriebsmittel)) ein. Hier sind verbreitet Vorteile bei der Injektionsdüngung zu erkennen.

(2) Die Ertrags- und Qualitätswirksamkeit von späten N-Gaben und somit ihre Wirtschaftlichkeit ist umstritten, da sie stark vom Witterungsverlauf abhängt. Unterstellt man beispielhaft, dass der Rohproteingehalt bei Weizen durch eine Qualitätsgabe nur jedes 2. Jahr wirtschaftlich über die Qualitätsgrenze angehoben werden kann, dann sind Düngungskosten (N + Ausbringkosten) jedes 2. Jahr unwirtschaftlich. In Gebieten mit Sommertrockenheit und ohne Beregnung ist dies sicherlich die Regel.

(3) Die Zeitspannen, in denen Spätgaben ertrags- und qualitätswirksam ausgebracht werden müssen, sind sehr eng, ebenfalls witterungsabhängig und kollidieren oft mit anderen Arbeitsgängen.

Nicht vergessen werden darf zudem, dass neben dem Stickstoff in vielen angebotenen N-Lösungen Schwefel enthalten ist, der z.T. kostenneutral mit ausgebracht wird, wodurch sich eine zusätzliche Schwefeldüngung erübrigt.

4.1 Ausblick

Neben den aktuell erkennbaren Vorteilen, welche die Injektionsdüngung aktuell schon bietet, sind die potentiellen Vorteile vielfach noch gar nicht erkannt worden. So kann Gülle separiert und durch eine Injektionsdüngung effektiver und gezielter als Dünger eingesetzt werden als bei der verbreiteten oberflächlichen Ausbringung. Dadurch wird auch die Pflanzenverfügbarkeit der anderen Nährstoffe in der Gülle erhöht. Aus Gründen der Arbeitseffizienz wäre es sogar vorteilhaft, wenn separierte Gülle mit Stickstoff angereichert und die Gülle in einem Arbeitsgang mit der Mineraldüngung ausgebracht werden könnte. Zusätze von Mikronährstoffen zur N-Lösung helfen Mikronährstoffmangelsituationen zu vermeiden. Diese Strategie eröffnet auch einen effizienten Weg zur Verwertung der zunehmend anfallenden flüssigen Reststoffe aus Biogasanlagen.

Einen weiteren Zukunftsaspekt stellt der Zusatz von systemischen Pflanzenschutzmitteln zu Injektionslösungen dar. Diese Praxis ist in den USA weit verbreitet. So ist dort der insektizide Wirkstoff Imidacloprid für die Bodeninjektion zugelassen und wird in vielen Kulturen (z.B. Gemüse, Baumwolle, Kartoffeln) als Standardmaßnahme eingesetzt. Der Wirkstoff ist im Boden kaum beweglich und muss dicht an die Pflanzen abgelegt werden, damit die überwiegend nach unten wachsenden Pflanzenwurzeln diesen auch aufnehmen. Da, wie gezeigt, die Wurzeln um ein Ammoniumdepot ein dichtes Wurzelnetz ausbilden und aktiv darauf zuwachsen, würde eine Formulierung mit N-Lösungen enorme Effizienzsteigerungen darstellen bei Schädlingen, die ständig auftreten und die prophylaktisch bekämpft werden müssen. Denkbar ist dies zum Beispiel für die Bekämpfung der 4 nachfolgend auftretenden Rapsinsekten (Stengelrüssler, Rapsglanzkäfer, Kohlschotenrüssler, Kohlschotenmücke), die bisher mit jeweils einzelnen Spritzungen, mit all den durch die Pflanzenhöhe hervorgerufenen technischen (Höhe des Spritzgestänges) und ökologischen Problemen (z.B. Windanfälligkeit der Sprühapplikation, Abdrift, Nützlingsschädlichkeit), bekämpft werden müssen. Ein systemisches Insektizid, welches über das N-Depot und den gesamten Befallszeitraum von der Pflanze aufgenommen würde, würde die 4 Schädlinge mit einer einzigen Injektion bekämpfbar machen und viele der o.a. ökologischen und bekämpfungstechnischen Probleme überwinden. Auch die Bekämpfung der Kraut- und Knollenfäule der Kartoffel, die jährlich auftritt, erfolgt in den USA erfolgreich über eine Bodenapplikation. Aktuell lässt das deutsche Pflanzenschutzrecht allerdings solche Bekämpfungsstrategien nicht zu, doch zeigen diese Beispiele, welche Entwicklungspotentiale bei der Injektionsdüngung noch zu erwarten sind.

In einem Projekt im Trinkwasserschutzgebiet Meyenburg werden derzeit (2006 – 2009) die Einsatzmöglichkeit der Injektionsdüngung und deren ökonomischen und ökologischen Konsequenzen für die Landwirte und die Wasserversorger in enger

Zusammenarbeit zwischen den dort wirtschaftenden Landwirten, der ppm Agrarberatung und dem Institut für Pflanzenbau und Grünlandwirtschaft der FAL untersucht. In weiteren Feld- und Gefäßversuchen prüft das Institut die Wirksamkeit bei unterschiedlichen Ackerkulturen, offene Fragen des N-Umsatzes im Boden und in der Pflanze, pflanzenphysiologische Vorgänge in Wurzeln und Spross in Abhängigkeit von der Zusammensetzung der Düngelösung (z.B. Wasserverbrauch bei platzierter Ammoniumdüngung) sowie ökologische Aspekte.

Nicht alle Erfahrungen aus dem Ausland lassen sich direkt auf deutsche und europäische Anbauverhältnisse übertragen, und eine Reihe von Fragen, die Praktiker und Wissenschaftler bewegen und für eine objektive Bewertung sowie einer Optimierung des Injektionsverfahren zwingend erforderlich sind, sind noch offen. Doch die arbeitswirtschaftlichen und ökologischen Effekte, sowie die bisherigen Ergebnisse zeigen deutlich das Potenzial dieser Technik zur Verlustminderung bei der Stickstoffdüngung und lassen hoffen, dass die Einsatzfläche in der Praxis weiter zunimmt.

5 Literatur

- Aderholt, D. (1995) Einfluss bevorzugter Fließwege auf die Verlagerung von Herbiziden im Bodenprofil. Diss. Universität Hannover, Fachbereich Gartenbau
- Bacher W, Blanke M (1999) Einfluss von Ammoniumernährung bei Kohlrabi auf Benetzbarkeit, Lichtreflexion und Lichtausbeute. *J Appl Bot* 73(1):34-37
- Beck W. (2004) N-Düngung nah dem CULTAN-Verfahren. *Kartoffelbau* 4, 116 – 121
- Boelke, B (2003) Effekte der Injektionsdüngung auf Ertrag und Qualität von Getreide und Raps in Mecklenburg-Vorpommern. *Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 245*, 47 - 53
- Bommes, C. (2006) Nur noch einmal düngen!. *Landwirtschaft ohne Pflug*, 2/2006, 19 - 23
- Cramer M.D., O.W. Lewis (1993). The influence of Nitrate and Ammonium Nutrition on the Growth of Wheat (*Triticum aestivum*) and Maize (*Zea mays*) Plants. *Annals of Botany* 72: 359 -365
- Felgentreu, C (2003) Erste Ergebnisse beim Einsatz des Injektionsverfahrens bei Winterraps in Brandenburg. *Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 245*, 57 - 60
- Gutser, R. (2006) Nitrifikationsinhibitoren zur Steuerung der N-Freisetzung aus mineralischen und organischen Düngemitteln, *Pflanzenernährung*, TU-München, **RKL-Schrift 4.1.1.2.0, S. 377 ff.**
- Havlin, J.L., J.D. Beaton, S.L. Tisdale, W.L. Nelson (1999). *Soil Fertility and Fertilizers – an Introduction to Nutrient Management*. 6th ed., Prentice Hall, ISBN 0-13-626806-4
- Jacobs, G (2005) Braucht Weizen mehr Stickstoff? *Dünger magazin* Dezember 05, *DLG Mitteilungen*, 2 - 5

- Koch H.J., Schlinker G und Kücke M. (2006) Effiziente N-Ernährung durch ammoniumbetonte N-Applikation in den Boden? Zuckerrübe 2/2006, 106 - 107
- Köhler, S., W.-A. Bischoff, H.-P. Liebig (2003) CULTAN-Düngung – Ein Beitrag zum Grundwasserschutz durch Verringerung des Nitrataustrages. Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 245, 117 – 127
- Kücke M (2004) Düngung mit nur einer N-Gabe? : Mit dem Cultan-Verfahren geht's! Berichte / Fördergemeinschaft, Ökologische Stoffverwertung eV Halle (Saale) 2004/1:51-62
- Kücke M und Küntzel U (1999) Achtung bei Flüssigdüngern auf Grünland: Bilanzen verschiedener Stickstoffdünger vergleichen. DLZ-Agrarmagazin 50 (4): 74-76
- Kücke, M (2003) Ertrag und Kornqualität von Winterweizen und Winterroggen nach N-Injektionsdüngung – Feldversuchsergebnisse 2001. Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 245, 69 – 80
- Lohry, R (1998) Surface Banding Superior to Broadcasting on Reduced-Till. Fluid Journal, Issue 22, Vol. 6, No. 3, 1998, 14-18
- Leufen C., K. Sommer, W.-W. Scherer (in press). Anbau von Kartoffeln nach dem CULTAN-Verfahren.
- Murphy, L. (1983) Fertilizer placement: Improved Efficiency for reduced Tillage Crops. Proceedings of 33rd Annual Meeting of the Fertilizer Industry Round Table, 82-90
- Schumacher, F.-J. (2003) Praxiserfahrungen mit der Düngung nach dem CULTAN-Verfahren am Niederrhein. Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 245, 61 - 68
- Sommer, K. (2000). "CULTAN"-cropping systems: fundamentals, state of development and perspectives. In: Nitrogen in a sustainable ecosystem: from the cell to the plant; Ed. M. A. Martins-Loucao and S.H. Lips, pp 361 – 375, Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands
- Sommer, K. (2005) CULTAN-Düngung – physiologisch ökologisch, ökonomisch optimiertes Düngeverfahren für Ackerkulturen, Grünland, Gemüse, Zierpflanzen und Obstgehölze. AgroConcept GmbH Bonn; ISBN 3-7862-0151-X
- Terman, G. L. (1979). Volatilization losses of nitrogen as ammonia from surface-applied fertilizers on organic amendments and crop residues. Adv. in Agron. 31: 189 – 375
- Walter, E.E. (2003) Die CULTAN-Düngung – Eine weitere Maßnahme zur Grundwasser-Sanierung der Wasserversorgung Grünbachgruppe – Mehrjährige Erfahrungen. Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 245, 103 – 115
- Weimar, S. (2003) Untersuchungen zur N-Düngung nach dem CULTAN-verfahren bei Getreide, Zuckerrüben und Kartoffeln in Rheinland-Pfalz. Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 245, 23 - 44