

CULTAN-Düngung reduziert die Stickstoffauswaschung bei gleichbleibendem Ertrag

Guénola Bernert, Ernst Spiess und Frank Liebisch
Agroscope, Gewässerschutz und Stoffflüsse, 8046 Zürich, Schweiz

Auskünfte: Frank Liebisch, frank.liebisch@agroscope.admin.ch

<https://doi.org/10.34776/afs14-207g> Publikationsdatum: 4. Oktober 2023



Bei der CULTAN-Düngung wird Stickstoff als konzentrierte Ammoniumlösung in den Boden injiziert. (Foto: Martin Häberli)

Zusammenfassung

Die Düngungstechnik CULTAN (Controlled Uptake Long Term Ammonium Nutrition), bei der eine konzentrierte Ammoniumlösung in den Boden injiziert wird, soll sich positiv auf die Pflanzenphysiologie und die Stickstoff(N)-Nutzungseffizienz auswirken. Mit dieser Studie, die auf einem 12-jährigen Lysimeterversuch und einer 3-jährigen Feldstudie basiert, soll beurteilt werden, ob CULTAN im schweizerischen Ackerbau zu einer geringeren N-Auswaschung bei gleichbleibenden Erträgen beiträgt. Das CULTAN-Verfahren schnitt ertragsmässig ähnlich gut ab wie das Verfahren mit oberflächlich ausgebrachtem Ammonsalpeter, erreichte aber tendenziell eine höhere N-Ausnutzung und

eine um 38 % geringere N-Auswaschung pro Ertrags-einheit. Unsere Analyse deutet darauf hin, dass bei der CULTAN-Düngung der Ausbringungszeitpunkt und die Platzierung der Ammoniumlösung besser an die Physiologie der Pflanzen und die pedoklimatischen Bedingungen angepasst werden müssen, um eine optimale Wirkung zu erzielen. Wir haben auch Hinweise gefunden, dass CULTAN neben der Pflanzenaufnahme und der N-Auswaschung auch andere N-Flüsse verändern kann.

Key words: N leaching, N fate, CULTAN, NH_4^+ nutrition, injection fertilisation.

Einleitung

Erhöhte Nitrat(NO_3^-)-Konzentrationen im Grundwasser werden durch den Ackerbau und dessen N-Düngung mitverursacht. In der Nationalen Grundwasserbeobachtung (NAQUA) überstieg im Jahr 2014 die Nitratkonzentration bei 40 % der Messstellen in Gebieten mit Ackerbau als Hauptnutzungsform den Grenzwert der Gewässerschutzverordnung von 25 mg l^{-1} , bei dessen Überschreitung Massnahmen zur Reduktion erforderlich sind. Bei 12 % wurde sogar der Höchstwert der Lebensmittelgesetzgebung für Trinkwasser von 40 mg l^{-1} (BAFU, 2019) überschritten. Nitrat im Grundwasser wird mit Gesundheitsrisiken für den Menschen in Verbindung gebracht (Rohrman *et al.*, 2021) und trägt nach Exfiltration in ein Fließgewässer zur Eutrophierung der Meere bei.

Bei der CULTAN-Düngungstechnik wird eine hochkonzentrierte Ammonium(NH_4^+)-Lösung mit niedrigem pH-Wert ($<5,5$) in den Boden injiziert. Die von Pflanzen bevorzugte Aufnahme von Stickstoff in Form von Ammonium fördert ein dichteres Wurzelsystem, verringert die Verlagerung von Aminosäuren von alten zu jungen Pflanzenteilen und stärkt die Apikalmeristeme des Sprosses (Sommer und Scherer, 2007).

Diese Studie konzentriert sich auf die Auswirkungen von CULTAN auf den Pflanzenertrag, die N-Nutzungseffizienz und die N-Auswaschung im Ackerbau.

Methode

Es wurden zwei Studien, in denen die CULTAN-Düngungstechnik mit der konventionellen oberflächlichen Ausbringung von Ammonsalpeter (ConvF) verglichen wurden, analysiert. Die erste Studie basiert auf einem 12-jährigen Lysimeterversuch in Zürich-Reckenholz mit zwei Perioden einer für das schweizerische Mittelland typischen Fruchtfolge und drei Wiederholungen pro Verfahren. Die N-Zufuhr entsprach bei ConvF 100 % der Normdüngung (GRUD; Richner und Sinaj, 2017). Bei CULTAN variierte die N-Düngung je nach Jahr zwischen 100 und 120 % der Norm (Mittelwert 115 %). CULTAN und ConvF wurden zudem in den ersten sieben Jahren mit einem Verfahren mit Ammonsalpeter verglichen, in dem die N-Zufuhr 130 % der Norm betrug (SurF).

Die zweite Studie umfasst eine Serie von Feldversuchen mit Winterweizen und Mais, die in den Jahren 2008 bis 2010 im nördlichen Kanton Zürich durchgeführt wurden. Jede Kultur wurde jedes Jahr an zwei Standorten auf Parzellen von $6 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ mit vier Wiederholungen pro Verfahren angebaut. Die Höhe der N-Düngung wurde von den Bewirtschaftern der Standorte festgelegt.

In beiden Studien wurden die folgenden Variablen analysiert:

- relativer Ertrag der geernteten Haupt- und Nebenprodukte der Kulturen (in Prozent des Referzertrags der GRUD; Richner und Sinaj, 2017)
- Ertragsstruktur bei Getreide: Ährenzahl pro m^2 , Kornzahl je Ähre und Tausendkorngewicht
- scheinbare N-Ausnutzung (N-Entzug des gedüngten Verfahrens – N-Entzug des ungedüngten Verfahrens) / N-Düngung)
- N-Bilanz: N-Düngung – (N-Entzug des gedüngten Verfahrens – N-Entzug des ungedüngten Verfahrens)

Im Lysimeterversuch wurden die Sickerwassermenge, die Nitratkonzentration des Sickerwassers und die N-Auswaschung vom 25. Februar 2009 bis zum 25. März 2021 gemessen. Die Auswaschungswerte basieren auf einer Referenzperiode, die vom 1. September bis zum 31. August des folgenden Jahres reicht. Um die Auswirkungen der Verfahren auf die N-Auswaschung unter Berücksichtigung der Pflanzenerträge bewerten zu können, wurde die N-Auswaschung nicht nur wie üblich pro Flächeneinheit, sondern auch pro Ertragseinheit des Hauptprodukts ausgedrückt. Im Feldversuch wurde der Boden vor jeder N-Düngergabe sowie nach der Ernte bis in 90 cm Tiefe beprobt, um den mineralischen Stickstoff (N_{min}) zu messen, der als Indikator für das Auswaschungsrisiko und für die Stabilität des Ammonium-Depots im CULTAN-Verfahren diente. Bei Vegetationsbeginn wurde jeweils nur ein N_{min} -Wert für alle Versuchspartellen und danach Werte pro Verfahren bestimmt.

Ergebnisse

Pflanzenertrag und scheinbare N-Ausnutzung

Im Lysimeterversuch fielen die Erträge des Hauptprodukts bei CULTAN etwas höher (+7 %) aus als bei ConvF, wobei die Unterschiede beim Getreide am höchsten waren. Dagegen schnitten in der Feldstudie beide Verfahren ähnlich ab (Tab. 1). Die Erträge des Nebenprodukts waren bei CULTAN sowohl in der Lysimeter- als auch in der Feldstudie höher als bei ConvF, mit signifikanten Unterschieden für Winterweizen und Triticale. Im CULTAN-Verfahren wies das Getreide eine höhere Ährenzahl auf, die Kornzahl je Ähre und das Tausendkorngewicht waren dagegen tendenziell geringer. Die Silomais- und Rapsenerträge wiesen keine signifikanten Verfahrensunterschiede auf. Bei den Zuckerrüben wurde für CULTAN eine Tendenz zu etwas geringeren Erträgen (–6 %) festgestellt.

Im CULTAN-Verfahren war die scheinbare N-Ausnutzung in beiden Versuchen und bei allen Kulturen höher, wobei der Unterschied nur in der Feldstudie bei Winterweizen signifikant war (Tab. 1). Im Lysimeterversuch fiel die scheinbare N-Ausnutzung bei CULTAN trotz der 15 % höheren N-Düngung um 12 % höher aus als bei ConvF. Zudem erreichte CULTAN in acht von elf Jahren eine bessere N-Ausnutzung, allerdings war der Unterschied nie statistisch signifikant.

Die Beziehung zwischen der N-Bilanz und der N-Auswaschung pro Flächeneinheit zeigt einen Ausreisser in ConvF (Abb. 1). In diesem Lysimeter verlief die Sickerwasserbildung jedoch ähnlich wie in den anderen Lysimetern und es gab keine Anzeichen für Makroporenfluss. Setzt man den Achsenabschnitt der Regressionsgeraden auf null, so deutet die Steigung von 0,2 auf einen nur schwachen Zusammenhang zwischen der N-Bilanz und der N-Auswaschung hin.

N_{min}-Gehalt des Bodens in der Feldstudie

Vor dem Schossen des Winterweizens (vier Wochen nach der CULTAN-Injektion bzw. gerade nach der zweiten N-Düngergabe in ConvF) wies der Boden bei CULTAN 12 kg ha⁻¹ weniger pflanzenverfügbaren Stickstoff auf als bei ConvF (Abb. 2a). Vor dem Ährenschieben (6–8 Wochen nach der Injektion bzw. nach der dritten N-Düngergabe) enthielt der Boden bei CULTAN 20 kg ha⁻¹ weniger verfügbaren Stickstoff als bei ConvF. Im 4–5-Blattstadium von Mais, 4 Wochen nach der Injektion, wurde bei CULTAN mehr mineralischer Stickstoff im Boden gefunden als bei ConvF. Bei der Maisernte, die im Durchschnitt 22 Wochen nach der Injektion stattfand, war der N_{min}-Gehalt bei CULTAN dagegen 21 kg ha⁻¹ niedriger als bei ConvF (Abb. 2b).

Tab. 1 | Ertrag und scheinbare N-Ausnutzung der Kulturen in beiden Verfahren sowie in beiden Versuchen (Mittelwert der Wiederholungen über Jahre und Standorte).

	Lysimeterversuch						Feldversuch	
	SM	WG	ZR	WW	Ra	Tr	SM	WW
Referenzertrag der GRUD (dt ha ⁻¹)								
Ertrag des Hauptprodukts	185	60	900	75	35	60	185	75
Ertrag des Nebenprodukts	n.a.	60	475	75	90	75	n.a.	75
Relativer Ertrag des Hauptprodukts		*		*				
CULTAN	0,99a	1,82a	1,16a	1,31a	1,10°	1,54°	1,29a	0,97a
ConvF	0,97a	1,52b	1,23a	1,19b	1,11°	1,21°	1,24a	0,97a
Relativer Ertrag des Nebenprodukts				*		*		*
CULTAN	n.a.	1,35a	0,44a	1,32a	n,a	1,26a	n.a.	1,08a
ConvF	n.a.	1,12a	0,39a	1,10b	n,a	1,04b	n.a.	0,99b
Scheinbare N-Ausnutzung								*
CULTAN	0,67a	0,88a	0,51a	0,80a	0,42a	0,56a	0,35a	0,68a
ConvF	0,57a	0,78a	0,47a	0,72a	0,37a	0,52a	0,30a	0,61b

SM = Silomais; WG = Wintergerste; ZR = Zuckerrüben; WW = Winterweizen; Ra = Raps; Tr = Triticale.

Asterix (*) zeigt statistische Signifikanz bei $p < 0,05$. Unterschiedliche Buchstaben innerhalb der Kultur eines Versuchs weisen auf einen signifikanten Unterschied ($p < 0,05$) zwischen den Verfahren hin.

° = Aufgrund fehlender Normalverteilung bzw. Heteroskedastizität der Residuen bei hierarchischen Daten wurde kein statistischer Test durchgeführt.

Kursiv gedruckte Zahlen und hellere Farbtöne stehen für Werte, die nur für eine der beiden Fruchtfolgeperioden verfügbar sind.

Farbcodes: Grün: Wert bei CULTAN um mehr als 4 % höher als bei ConvF; Rot: Wert bei CULTAN um mehr als 4 % niedriger als bei ConvF. N.a. = nicht verfügbar.

Tab. 2 | Mittlere jährliche Sickerwassermenge, Nitratkonzentration des Sickerwassers, N-Auswaschung und N-Bilanz im Lysimeterversuch.

Verfahren	Sickerwassermenge (mm)	Nitratkonzentration (mg NO ₃ ⁻¹)	N-Auswaschung pro Fläche (kg N ha ⁻¹)	N-Auswaschung pro Ertrag (g N dt ⁻¹)	N-Bilanz (kg N ha ⁻¹)
CULTAN	305a	11a	7,5a	86a	44,5a
ConvF	328b	16a	11,8a	140b	47,3a

Unterschiedliche Buchstaben weisen auf einen signifikanten Verfahrensunterschied hin. Die Auswertung für Sickerwasser und die flächenbezogene Nitratauswaschung wurde für den gesamten Zeitraum vom 25. Februar 2009 bis zum 25. März 2021 durchgeführt, wobei die Ergebnisse als Jahreswerte auf der Grundlage von 12,1 Jahren berechnet wurden. Die ertragsbezogene N-Auswaschung wurde anhand der Referenzjahre berechnet. Die N-Bilanz basiert nur auf den Daten von 11 Jahren, weil der Rapsentzug in der zweiten Fruchtfolge nicht erhoben wurde.

Auswirkungen der höheren N-Düngung im CULTAN-Verfahren des Lysimeterversuchs

In den ersten sieben Jahren des Lysimeterversuchs unterschied sich der relative Ertrag im Verfahren SurF, in dem die N-Zufuhr 130 % der Norm betrug, weder von ConvF noch von CULTAN signifikant. ConvF und SurF erreichten eine ähnliche scheinbare N-Ausnutzung, aber die N-Bilanz war bei SurF deutlich höher als bei ConvF (Daten nicht dargestellt). Die Nitratkonzentration des Sickerwassers und die N-Auswaschung lagen bei ConvF und SurF ebenfalls in einem ähnlichen Bereich.

Diskussion

CULTAN hat das Potenzial für eine geringere N-Auswaschung bei gleichbleibendem Ertrag

Obwohl der Unterschied in der flächenbezogenen N-Auswaschung von 38 % nicht signifikant war, wies das CULTAN-Verfahren in elf Jahren und bei allen Kulturen eine geringe Auswaschung auf. Dagegen wurde bei der ertragsbezogenen N-Auswaschung ein signifikanter Unterschied ermittelt. In der Feldstudie fiel darüber hinaus der N_{\min} -Gehalt nach der Mäisernte bei CULTAN niedrigerer aus, was auf ein geringeres Auswaschungsrisiko hindeutet.

Die flächenbezogene N-Auswaschung war in beiden Verfahren gering im Vergleich zum Durchschnittswert von 38 kg N ha^{-1} , der mit dem Stoffflussmodell MODIFUS für die gesamte Ackerfläche der Schweiz und das Jahr 2020 berechnet wurde (Hutchings *et al.*, 2023). Dies wirft die Frage auf, ob die Lysimeter die Wasser- und Stickstoffflüsse korrekt wiedergegeben haben. Die mittleren Nitratkonzentrationen des Sickerwassers lagen bei den sechs Lysimetern zwischen $9,5$ und $21,5 \text{ mg NO}_3^- \text{ l}^{-1}$, was niedrig ist angesichts der Tatsache, dass in 40 % der NAQUA-Messstationen in Gebieten mit Ackerbau als Hauptbodennutzung über $25 \text{ mg NO}_3^- \text{ l}^{-1}$ gemessen wurden (BAFU, 2019).

Die beiden hier vorgestellten Studien haben gezeigt, dass das Ertragsniveau mit CULTAN gehalten werden kann. Obwohl die Bedingungen auf den Lysimetern nicht vollständig denjenigen im Feld entsprechen, scheint CULTAN eine mögliche Massnahme für Gebiete zu sein, in denen die Nitrateinträge ins Grundwasser reduziert werden müssen.

Zeitpunkt und Platzierung der CULTAN-Injektion

Aufgrund des niedrigen pH-Werts und des hohen Ammoniumgehalts im Depot dürfte die mikrobielle Aktivität im CULTAN-Verfahren abnehmen und zu einer fortschreitenden Nitrifikation des Ammonium-Depots

führen. Es liegen jedoch nur beschränkte Kenntnisse über den zeitlichen Abbau des Depots vor. Beide Studien deuten auf eine suboptimale Synchronisierung zwischen der Nitrifikationsrate und dem N-Bedarf der Pflanzen in bestimmten Wachstumsstadien hin.

In der Feldstudie deuteten die N_{\min} -Messungen darauf hin, dass das Ammonium-Depot unter Winterweizen schnell abgebaut war, was mit einer hohen N-Aufnahme

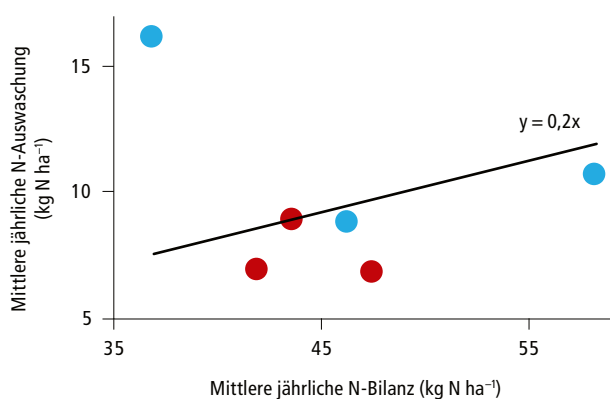


Abb. 1 | Beziehung zwischen der N-Bilanz und der flächenbezogenen N-Auswaschung für alle Lysimeter (rot: CULTAN, blau: ConvF).

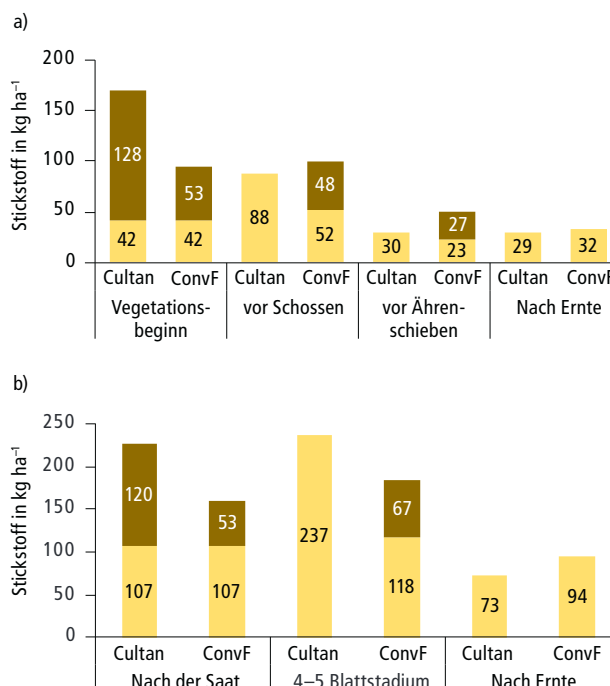


Abb. 2 | Menge an pflanzenverfügbarem Stickstoff in beiden Verfahren nach jeder N-Düngergabe und bei der Ernte von Winterweizen (a) und Mais (b) in der Feldstudie. Gelb: mineralischer Stickstoff im Boden (N_{\min}), gemessen in 0–90 cm Tiefe; braun: N-Düngergabe.

nach Wachstumsbeginn im Frühjahr und einer geringeren während der späteren Kornfüllungsperiode verbunden war. In einer Feldstudie mit Winterweizen fanden Deppe *et al.* (2016) heraus, dass das Ammonium-Depot vier Wochen nach der Injektion stark und nach zehn Wochen vollständig erschöpft war. Im Lysimeterversuch deuten der höhere Strohertrag, die höhere Ährendichte und das etwas geringere Tausendkorngewicht des Getreides im CULTAN-Verfahren ebenfalls darauf hin, dass sich die N_{\min} -Menge anders als bei ConvF entwickelte. Eine spätere Injektion könnte den N-Gehalt des Getreides und die Kornfüllung verbessern. Studien, die die Auswirkungen unterschiedlicher Injektionszeitpunkte auf den Ertrag von Wintergetreide untersuchten, lieferten jedoch uneinheitliche Ergebnisse und zeigten eine starke Abhängigkeit von Boden und Klima (Donath *et al.*, 2009; Albert *et al.*, 2012; Schulz *et al.*, 2014).

Auch die Physiologie einiger Kulturen kann eine spätere CULTAN-Injektion erfordern, um einen hohen Ertrag zu erzielen. Im Lysimeterversuch ist bemerkenswert, dass CULTAN in der ersten Fruchtfolge bei Raps und Zuckerrüben zu relativ höheren Erträgen führte, wenn die Injektion vier bzw. drei Wochen später als die erste Stickstoffgabe in ConvF erfolgte. Bei Raps kann ein früher N-Mangel in der Regel in späteren Wachstumsstadien ausgeglichen werden, aber eine zu frühe N-Gabe kann zu einem übermässigen Strohertrag auf Kosten des Körnerertrags führen. Für Zuckerrüben könnte eine verzögerte Injektion empfohlen werden, weil ihre Wurzeln zu Beginn der Kulturzeit langsam wachsen und das Depot möglicherweise nicht rechtzeitig erreichen (Kücke, 2003). Darüber hinaus kann eine frühe Ammonium-Zufuhr die Zuckerbildung behindern. In einer Feldstudie, in der die CULTAN-Lösung erst im 6–8-Blattstadium injiziert wurde, wurden höhere Rübenerträge und Zuckergehalte als nach einer oberflächlichen Ausbringung von Ammonsalpeter erzielt (Kücke, 2003).

Der Zeitpunkt der Injektion kann auch die N-Auswaschung beeinflussen. In einer Studie mit Winterweizen und Raps führte eine vier bzw. zwei Wochen später ausgeführte CULTAN-Injektion zu einer geringeren N-Auswaschung im Frühjahr, ohne dass sich dies auf N_{\min} -Gehalte im folgenden Winter auswirkte (Kücke, 2003).

Schliesslich sollte die Platzierung der Injektionen bei jeder Kultur an die strukturelle Entwicklung der Wurzeln angepasst werden, weil die räumliche Verteilung von Ammonium und Nitrat unter CULTAN heterogener ist (Deppe *et al.*, 2016). In den Lysimetern wurde die Platzierung nicht systematisch vorgenommen, was die Ergebnisse beeinflusst haben könnte.

Geringere N-Auswaschung nicht nur dank höherer N-Ausnutzungseffizienz

Wir fanden nur einen schwachen Zusammenhang zwischen der N-Bilanz und der N-Auswaschung. Dies könnte teilweise durch die fehlende Aufzeichnung des N-Entzugs von Raps in der zweiten Fruchtfolge bedingt sein, weil in diesem Jahr grosse verfahrensbedingte Unterschiede in der N-Auswaschung auftraten. Zudem kann mit der N-Bilanz die N-Auswaschung nicht so gut abgeschätzt werden, weil sie die nicht abgeführten Pflanzenteile (z. B. Rapsstroh) und die Gründüngungen nicht erfasst. Diese haben jedoch einen Einfluss auf die Höhe der N-Auswaschung. Auch Buczko *et al.* (2010) stellten bei der Analyse verschiedener Langzeitversuche fest, dass die N-Bilanz nur schwach mit der N-Auswaschung korreliert.

Die schwache Korrelation deutet aber darauf hin, dass Verfahrensunterschiede auch bei anderen N-Flüssen aufgetreten sein könnten. Möglicherweise wurde unter CULTAN mehr Stickstoff im Boden immobilisiert, denn gemäss Sommer und Scherer (2007) führt CULTAN zu einer höheren Wurzelbiomasse. Zwischen 2009 und 2021 konnte jedoch in beiden Verfahren keine Änderung im N-Gehalt des Oberbodens beobachtet werden. Zudem kann die Verlagerung des ausgebrachten, von den Pflanzen aber nicht aufgenommenen Dünger-N durch den Lysimeterboden auch länger gedauert haben als die Referenzperiode von einem Jahr. In Versuchen von Prasuhn *et al.* (2016) auf der gleichen Lysimeteranlage dauerte es 6 bis 18 Monate, bis der grösste Teil eines Bromid-Tracers den Lysimeterauslass erreicht hatte. Ein Versuch mit ^{15}N -markiertem Dünger (Sebilo *et al.*, 2013) hat gezeigt, dass der ungenutzte N-Dünger weitgehend in die organische Bodensubstanz eingebaut und in den folgenden Jahren und Jahrzehnten wieder mineralisiert wird.

Ein weiterer N-Fluss ist die Denitrifikation, die Lachgas(N_2O)-Emissionen erzeugen kann, aber es ist nicht klar, wie sich CULTAN auf diesen Verlustpfad auswirkt. Im Jahr 2009 waren die pH-Werte in den CULTAN-Lysimetern höher als in den ConvF-Lysimetern, aber CULTAN führte zu einer starken Versauerung des Bodens, so dass 2021 beide Verfahren ein ähnliches pH-Niveau aufwiesen. Somit könnten sich die mikrobielle Aktivität und die Denitrifikation im Laufe des Versuchs unterschiedlich zwischen den Verfahren entwickelt haben. In ihrer Studie fanden Deppe *et al.* (2016) etwa gleich hohe N_2O -Emissionen bei konventioneller Düngung und CULTAN. Um das CULTAN-Depot herum können jedoch lokale Hotspots mit hoher N_2O -Produktion auftreten, insbesondere in lehmigen Böden.

Chance für einen nachhaltigeren Einsatz von Stickstoffdüngern

Für die Produktion von N-Mineraldünger werden 3–5 % des weltweiten Erdgasverbrauchs benötigt, und es wird erwartet, dass die Energiekosten langfristig hoch bleiben werden. In diesem Zusammenhang könnte CULTAN aus zwei Gründen als eine Möglichkeit angesehen werden, die mit dem Einsatz von Mineraldüngern verbundenen Umweltprobleme zu verringern.

Erstens deutet der bei CULTAN über die Jahre und Studien hinweg beobachtete Trend zu einer höheren scheinbaren N-Ausnutzung darauf hin, dass das Ertragsniveau auch mit geringerem N-Einsatz gehalten werden könnte. Leider erhielt CULTAN im Lysimeterversuch einen höheren und nicht einen geringeren N-Dünger-einsatz. Der in den ersten sieben Jahren durchgeführte Vergleich zwischen CULTAN mit 113 % der empfohlenen N-Düngermenge und oberflächlich ausgebrachtem Ammonsalpeter mit 130 % der Norm zeigte jedoch deutlich, dass mit CULTAN trotz geringerer N-Zufuhr ähnliche Erträge und eine ähnliche N-Ausnutzung erreicht werden können.

Zweitens kann die CULTAN-Lösung aus Ammonium aus Abwässern und Gülle hergestellt werden. In der Schweiz produzieren einige Kläranlagen mittels Ammonium-Stripping einen flüssigen Ammoniumsulfatdünger, der frei von Schwermetallen und anderen Schadstoffen ist. Obwohl das Verfahren Investitionen erfordert und die Wirtschaftlichkeit von den Kosten für die Schwefelsäure abhängig ist, stellt CULTAN eine interessante Möglichkeit zur Wiederverwertung des Ammoniums dar und kann auf diese Weise zur Schliessung des Stickstoffkreislaufs beitragen.

Schlussfolgerungen

Diese Studie hat gezeigt, dass CULTAN zu einer deutlich geringeren N-Auswaschung führen kann als eine Düngung mit Ammonsalpeter, und zwar bei gleichem Ertragsniveau und mit einem durchgängigen Trend zu einer höheren N-Ausnutzung.

Der Zeitpunkt und die Platzierung der CULTAN-Injektion sollten besser an das Wachstum und die Physiologie der Kulturen und die pedoklimatischen Bedingungen angepasst werden. Insbesondere könnte eine spätere Anwendung von CULTAN ertragsfördernd sein und zu einer besseren Synchronisierung zwischen der Nitrifikation des Ammonium-Depots und dem N-Bedarf der Pflanzen führen. Wir haben auch festgestellt, dass die geringere N-Auswaschung unter CULTAN nur schwach

mit der höheren scheinbaren Ausnutzung zusammenhängt, was darauf hindeutet, dass CULTAN andere Verlustpfade beeinflussen kann.

Aufgrund dieser Ergebnisse und in Anbetracht der Möglichkeit zur Wiederverwertung von Ammonium aus Abwässern erscheint es sinnvoll, den Einsatz von CULTAN in Gebieten mit einer hohen Nitratkonzentration im Grundwasser zu fördern. Weitere Forschungsarbeiten sind erforderlich, um die Auswirkungen von CULTAN auf andere N-Flüsse, die Folgen einer verringerten N-Düngung auf das Ertragsniveau sowie den zeitlichen Verlauf der Nitrifikation des Ammonium-Depots unter verschiedenen pedoklimatischen Bedingungen zu untersuchen, damit der Einsatz von CULTAN in den bedeutendsten Kulturen optimiert werden kann. Im Weiteren erfordert die Umstellung auf CULTAN betriebliche Anpassungen (z. B. Spezialgerät zur Ausbringung, Transport und Zwischenlagerung der Düngertlösung). Entweder muss der Landwirtschaftsbetrieb diese Investitionen selbst tätigen oder er lässt CULTAN durch einen dafür spezialisierten Lohnunternehmer ausbringen. ■

Dank

Diese Studie wurde vom Bundesamt für Umwelt finanziert. Die Autoren bedanken sich bei Clay Humphrys und Volker Prasuhn für die Durchführung des Lysimeterversuchs, bei René Flisch für die Feldversuchsdaten und hilfreiche Kommentare sowie bei Martin Häberli, Guido Steger und Peter Briner AG für praktische Diskussionen und hilfreiche Kommentare.

Literatur

- Albert, E., Schliephake, W., & Grunert, M. (2012). Ergebnisse zur N-Düngung mit dem CULTAN-Verfahren auf verschiedenen sächsischen Standorten. In D. Orzessek & A. Deubel (eds.), *Nährstoff- und Wasserversorgung der Pflanzenbestände unter den Bedingungen der Klimaerwärmung*. Bernburg-Strenzfeld, 45–54.
- BAFU (2019). *Zustand und Entwicklung Grundwasser Schweiz. Ergebnisse der Nationalen Grundwasserbeobachtung NAQUA, Stand 2016*. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern. Umwelt-Zustand Nr. 1901, 138 S.
- Buczko, U., Kuchenbuch, R. O., & Lennartz, B. (2010). Assessment of the predictive quality of simple indicator approaches for nitrate leaching from agricultural fields. *Journal of Environmental Management* 91, 1305-1315. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.02.007>
- Deppe, M., Well, R., Kücke, M., Fuss, R., Giesemann, A., & Flessa, H. (2016). Impact of CULTAN fertilization with ammonium sulfate on field emissions of nitrous oxide. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 219, 138–151. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.12.015>
- Donath, S., Döhler, J., Grossmann, I., Schulz, R., Gruber, S., Claupein, W., & Müller, T. (2009). Ammonium-Depot-Düngung zu Winterweizen im Feldexperiment. *VDLUFA-Schriftenreihe* 65, 407-413.
- Hutchings, C., Spiess, E. and Prasuhn, V. (2023). Abschätzung diffuser Stickstoff- und Phosphoreinträge in die Gewässer der Schweiz mit MODIFFUS 3.1, Stand 2020. *Agroscope Science* Nr. 155, 161 S.
- Kücke, M. (2003). Anbauverfahren mit N-Injektion (CULTAN) Ergebnisse, Perspektiven, Erfahrungen; Beiträge des Workshops am 29. November 2001 in Braunschweig. *Landbauforschung Völkenrode Sonderheft* 245, Beiträge von Seiten 23-44, 45-53, 81-92, 105–118.
- Prasuhn, V., Humphrys, C., & Spiess, E. (2016). Seventy-two lysimeters for measuring water flows and nitrate leaching under arable land. *NAS International Workshop on Applying the Lysimeter Systems to Water and Nutrient Dynamics*, 124-146. Wanju, Korea: National Institute of Agricultural Sciences.
- Richner, W., & Sinaj, S., (2017). Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD 2017). *Agrarforschung Schweiz* 8 (6), Spezialpublikation, 276 S.
- Rohrmann S., Bisig-Inanir D., Dehler A. und Brüschweiler B.J. (2021): Hat der Nitratgehalt im Trinkwasser einen Einfluss auf das Dickdarmkrebsrisiko? *Schweizer Ernährungsbulletin* 60–73. DOI: 10.24444/blv-2021-0111
- Schulz, R., Makary, T., Hubert, S., Hartung, K., Gruber, S., Donath, S., *et al.* (2014). Is it necessary to split nitrogen fertilisation for winter wheat? On-farm research on luvisols in South-West Germany. *Journal of Agriculture Science*, 153, 575–587. <https://doi.org/10.1017/S0021859614000288>
- Sebilio, M., Mayer, B., Nicolardot, B., Pinay, G., & Mariotti, A. (2013). Long-term fate of nitrate fertilizer in agricultural soils. *PNAS* 110, 18185-18189.
- Sommer, K., & Scherer, H. (2007). Source / sink – relationships in plants as depending on ammonium as «CULTAN», nitrate or urea as available nitrogen fertilisers. *International Symposium «Sink-Source Relationships in Plants»*, Kalingrad.