

Stickstoffausnutzungseffizienz von Biogasgülle

Klaus Jarosch^{1,2}, Walter Richner¹ und Jochen Mayer¹

¹Agroscope, 8046 Zürich, Schweiz

²Geographisches Institut, Universität Bern, 3012 Bern, Schweiz

Auskünfte: Jochen Mayer, E-Mail: jochen.mayer@agroscope.admin.ch



Das Gärgut aus Biogasanlagen eignet sich als rasch wirksame N-Quelle für Ackerkulturen oder Grünland: landwirtschaftliche Vergärungsanlage in Kaisten (AG). (Foto: Jacques Fuchs, FiBL)

Einleitung

Die Vergärung organischer Abfälle zur Gewinnung von Biogas hat in den letzten Jahren in der Schweiz an Bedeutung gewonnen. Durch ein stetes Wachstum seit den 1990er-Jahren gibt es schweizweit derzeit knapp hundert landwirtschaftliche Biogas- beziehungsweise gewerbliche Vergärungsanlagen (Mandaliev und Schleiss 2016). In diesen Anlagen werden Hofdünger (Mist und Gülle) allein oder in Mischungen mit biogenen Abfällen aus der kommunalen Sammlung oder Lebensmittelverarbeitung (Grünschnitt, Gemüseabfälle, Fette etc.) vergoren. Während des Vergärungsprozesses werden komplexe organische Verbindungen wie Zellulose, Proteine oder Fettsäuren von anaeroben Mikroorganismen abgebaut. Dabei entsteht Biogas (Methan), das einer energetischen Nutzung wie Energiegewinnung oder Verstromung zugeführt wird. Aus organischen Stickstoff(N)-Verbindungen werden anorganische N-Verbindungen, vor allem Ammonium-N ($\text{NH}_4\text{-N}$), freigesetzt,

die für Pflanzen direkt verfügbar sind. Der Anteil an $\text{NH}_4\text{-N}$ im Gärgut nimmt durch den Vergärungsprozess zu, während der Anteil an organisch gebundenem N (N_{org}) abnimmt. Weil Mikroorganismen dabei leicht verfügbaren Kohlenstoff abbauen, ist in Folge mit einer geringeren $\text{NH}_4\text{-N}$ -Immobilisierung nach Ausbringung von Gärgut im Vergleich zu nicht vergorenen Substraten zu rechnen. Die Vergärung stellt somit eine Aufwertung des Ausgangsstoffes in Bezug auf die pflanzenbauliche N-Verfügbarkeit dar, vor allem bei der Vergärung leicht zersetzbarer organischer Verbindungen. Gärgut eignet sich daher als rasch wirksame N-Quelle für Ackerkulturen oder Grünland.

Dennoch sind auch nach der Vergärung noch erhebliche Mengen an organischem N im Gärgut enthalten. Bei wiederholter Ausbringung von Gärprodukten über mehrere Jahre reichert sich ein Vorrat an organischem N im Boden an. Durch die Mineralisierung des organi-

schen N im Boden wird dieser über einen längeren Zeitraum pflanzenverfügbar. Über die langfristige N-Ausnutzungseffizienz (NAE) von Gärgut, vor allem durch die Mineralisierung aus organischen N-Vorräten durch wiederholte Ausbringung, ist bisher wenig bekannt (Richner *et al.* 2017). Dies liegt zum einen daran, dass die Vergärungstechnologie erst seit wenigen Jahren grossflächigere Anwendung findet, zum anderen, dass die Qualität und Zusammensetzung von Gärgut stark variieren, da verschiedene Ausgangssubstrate und Prozessparameter wie Vergärungsdauer und -temperatur wesentlichen Einfluss auf seine Eigenschaften haben. In Zukunft ist mit einer Zunahme von landwirtschaftlichen Vergärungsanlagen und grösseren Mengen an flüssigem Gärgut zu rechnen. Studien aus Langzeit-Feldversuchen zur NAE liegen momentan nicht in ausreichendem Umfang vor, um gesicherte Aussagen machen zu können. Ziel dieser Arbeit war es deshalb, anhand von Literaturrecherchen und einer Modellstudie die mittel- bis langfristige NAE von flüssigem Gärgut aus landwirtschaftlichen Biogasanlagen der Schweiz abzuschätzen.

Material und Methoden

Literaturrecherche

Die wissenschaftliche Literatur zum Thema langfristige NAE von Gärgut wurde ausgewertet. Generell zeigte sich, dass relativ wenige Arbeiten für die in der Schweiz relevanten Bedingungen publiziert wurden. Auch gingen die meisten Studien selten über eine dreijährige Versuchsperiode hinaus. Dennoch konnten einige generelle Aussagen abgeleitet werden:

- Der N-Düngereffekt von Gärprodukten war in vielen Fällen höher als der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalt erwarten liesse. Dies spricht für eine zusätzliche Mineralisierung von organischen N-Verbindungen nach der Ausbringung des Gärprodukts, die den Pflanzen zu Gute kommt (Möller und Müller 2012; Fouda *et al.* 2013; Nkoa 2014).
- Die Mineralisierung von organischem N aus Gärprodukten verläuft nicht konstant über die Zeit. Vielmehr sind in den ersten Jahren nach der Ausbringung höhere Mineralisierungsraten zu erwarten als in den Folgejahren (Gutser *et al.* 2005; Webb *et al.* 2013).
- Die in der Literatur gefundene Bandbreite der Mineralisierung des organischen N von Gärgülle reicht von 7–20 % (40 %¹) im Jahr der Ausbringung über 2,6–5 % (9 %¹) im darauffolgenden Jahr bis zu 1,1–2 % (3 %¹) in den Folgejahren (Klausner *et al.* 1994; Schröder *et al.* 2007; Gunnarsson *et al.* 2010; Rigby und Smith 2013).

¹ Prozentwerte in Klammern geben Maximalwerte aus der Literaturrecherche an, die in den hier vorgestellten Szenarien nicht berücksichtigt wurden.

Zusammenfassung

Die Vergärung von Hofdüngern und anderen organischen Materialien hat in den letzten Jahren stark an Bedeutung gewonnen. Durch den Vergärungsprozess wird Biogas (Methan) gewonnen und der Anteil an leicht verfügbaren Stickstoffverbindungen in der gewonnenen Gärgülle erhöht. Über den Düngewert von Gärgülle gibt es bisher nur wenig für Schweizer Bedingungen relevante Forschung, vor allem in Bezug auf die langfristige Stickstoffverfügbarkeit. Mittels eines numerischen Modells wird die Stickstoffausnutzungseffizienz von in der Schweiz üblichen Gärgüllen abgeschätzt. Je nach Gärgüllequalität werden innerhalb von 80 Jahren Stickstoffausnutzungseffizienzen von 64 % bis 83 % erreicht. Die Mineralisierung von organischem Stickstoff in den Folgejahren der Ausbringung trägt dabei substantiell zur hohen Stickstoffausnutzungseffizienz bei wiederholter Ausbringung bei.

Der Gehalt an $\text{NH}_4\text{-N}$ allein kann folglich nur bedingt als Indikator zur Abschätzung der langfristigen N-Verfügbarkeit von Gärprodukten verwendet werden. Vielmehr muss auch die Mineralisierung der in den Gärprodukten vorhandenen organischen N-Verbindungen berücksichtigt werden, um Aussagen zur N-Verfügbarkeit über längere Ausbringungsperioden treffen zu können. Aus der hohen Diversität an Ausgangssubstraten der Vergärung resultieren aber sehr variable Abbauraten von organischem N der Gärprodukte.

Modell zur Abschätzung der N-Ausnutzungseffizienz

Basierend auf den Ergebnissen der Literaturrecherche wurde ein mathematisches Modell entwickelt, mit dem die effektive N-Düngerwirkung von Gärprodukten bei wiederholter Ausbringung abgeschätzt werden sollte. Die Menge an pflanzenverfügbarem N ($N_{\text{verfügbar}}$) setzt sich dabei aus dem $\text{NH}_4\text{-N}$ im Gärprodukt plus der durch Mineralisierung aus N_{org} freigesetzten N-Menge zusammen. Zusätzlich werden die wichtigsten Verlustpfade berücksichtigt:

$N_{\text{verfügbar}} = \text{NH}_4\text{-N (im Jahr der Ausbringung)} - \text{NH}_4\text{-N-Verluste bei Ausbringung} + \text{kumulativ mineralisierter } N_{\text{org}} - \text{Verluste durch Auswaschung und Denitrifikation}$

Die Annahme, dass der gesamte $\text{NH}_4\text{-N}$ direkt pflanzenverfügbar ist, vernachlässigt bei dieser Berechnung die Möglichkeit der mikrobiellen N-Immobilisierung. Aufgrund der relativ geringen Konzentration an leicht mikrobiell verfügbaren Kohlenstoffquellen im Gärgut und damit einhergehenden geringeren N-Immobilisierungsraten (Alburquerque *et al.* 2012; Webb *et al.* 2013) wird dieser Prozess in unserem Modell nicht weiter berücksichtigt.

Mineralisierter N_{org} ist der Anteil an organischem N, der im Boden zu $\text{NH}_4\text{-N}$ mineralisiert und dadurch pflanzenverfügbar wird. Es wurden drei Zeitabschnitte der N-Mineralisierung unterschieden: 1) N-Mineralisierung im Jahr der Ausbringung, 2) N-Mineralisierung im Folgejahr nach Ausbringung und 3) N-Mineralisierung in weiteren Folgejahren. Jedem dieser drei Zeitabschnitte wurden eigene Mineralisierungsraten zugewiesen, die aus der verfügbaren Literatur abgeleitet wurden. Weil je nach Umweltbedingungen (Standorttemperatur, Bodenfeuchte) und der Abbaubarkeit des N_{org} die Mineralisierungsraten variieren können, errechneten wir zwei Szenarien mit unterschiedlichen Mineralisierungsraten pro Zeitabschnitt. In Szenario A gingen wir von einer mittleren Mineralisierung des ausgebrachten N_{org} aus (20 % im ersten Jahr; 5 % im Folgejahr und 2 % in den darauffolgenden Jahren) (Tab. 1). In Szenario B wurden hingegen langsame Mineralisierungsraten von 7 %, 2,6 % und 1,1 % für die drei Zeitabschnitte gewählt. Unter der Annahme einer wiederholten Ausbringung von Gärgut ist die Gesamtmenge an mineralisiertem organischem N die Summe aller Mineralisierungsprodukte aus N_{org} -Einträgen von verschiedenen Jahren. Einerseits nimmt dabei der Vorrat an verbleibendem N_{org} aus den Vorgängerjahren mit jedem Jahr ab, andererseits stellen neue Gärgutgaben wieder frischen N_{org} zur Verfügung. Wurde ein Feld beispielsweise für fünf Jahre wiederholt mit Gärgut gedüngt, ergeben sich daraus fünf verschiedene organische N-Fractionen mit jeweils eigenen Mineralisierungsraten:

Summe an mineralisiertem organischem N
nach fünf Jahren wiederholter Ausbringung =
neu zugefügter N_{org} in Jahr 5 * Mineralisierungsrate
im Jahr der Ausbringung +
verbleibender N_{org} aus Jahr 4 * Mineralisierungsrate
im Folgejahr nach Ausbringung +
verbleibender N_{org} aus Jahr 3 * Mineralisierungsrate
in weiteren Folgejahren +
verbleibender N_{org} aus Jahr 2 * Mineralisierungsrate
in weiteren Folgejahren +
verbleibender N_{org} aus Jahr 1 * Mineralisierungsrate
in weiteren Folgejahren

Tab. 1 | Szenarien einer mittleren (A) und langsamen (B) Stickstoffmineralisierungsrate von N_{org} nach Jahren der Ausbringung basierend auf verfügbaren Daten aus der Literatur.

	Szenario A	Szenario B
Ausbringungsjahr	20 %	7 %
Erstes Folgejahr	5 %	2,6 %
Weitere Folgejahre	2 %	1,1 %

Ausgasungs- und Auswaschungsverluste wurden im Modell durch die Annahme berücksichtigt, dass im Durchschnitt 15 % des durch Mineralisierung freigesetzten anorganischen N verloren gehen. Zusätzlich berücksichtigt werden mögliche Ammoniak (NH_3)-Verluste bei der Ausbringung (Volatilisation), mit einem durchschnittlichen Verlust von 13 % des $\text{NH}_4\text{-N}$ (Häni *et al.* 2016) bei Schleppschlauchapplikation.

Um einen repräsentativen Überblick über die in der Schweiz verfügbaren Gärprodukte zu bekommen, werteten wir Analyseresultate der zentralen CVIS-Datenbank von 2013 bis 2016 aus. In dieser Datenbank werden Analysedaten von Recyclingdüngern für den kantonalen Vollzug gesammelt. Die ausgewählten Daten repräsentieren die Bandbreite der N-Gehalte von landwirtschaftlichem flüssigem Gärgut, hier als *Gärgülle* bezeichnet, und entsprechen dem obersten Perzentil (90 %), dem Median sowie dem untersten Perzentil (10 %). Die Bandbreite des $\text{NH}_4\text{-N}$ -Anteils am Gesamt-N betrug für den untersuchten Zeitraum 72 %, 57 % und 39 % (Tab. 2).

Resultate

Modellierte N-Verfügbarkeit

Anhand der Modellierung konnten wir die dynamischen Effekte unterschiedlicher Gärgüllevarianten und Mineralisierungsraten auf die N-Verfügbarkeit und die N-Verlustpotenziale abschätzen. In Abbildung 1 wird beispielhaft die zeitliche Entwicklung für Gärgülle mit einem $\text{NH}_4\text{-N}$ -Anteil von 57 % für das Szenario A (mittlere Mineralisierung) gezeigt. Man erkennt, dass in diesem Modelllauf konstant 13 % des $\text{NH}_4\text{-N}$ (entspricht 7 % des Gesamt-N) bei der Ausbringung verloren gehen. Der restliche $\text{NH}_4\text{-N}$ (50 % des Gesamt-N) sind im jeweiligen Ausbringungsjahr direkt pflanzenverfügbar. Zusätzlich werden im Ausbringungsjahr (Jahr 1) 20 % des organischen N durch Mineralisierung verfügbar gemacht, was einem Anteil von rund 7 % des Gesamt-N gleichkommt. Im ersten Folgejahr (Jahr 2) werden zusätzlich 5 % des verbleibenden N_{org} aus Jahr 1 mineralisiert. Ab dem 3. Jahr trägt die Mineralisierung aus dem verblei-

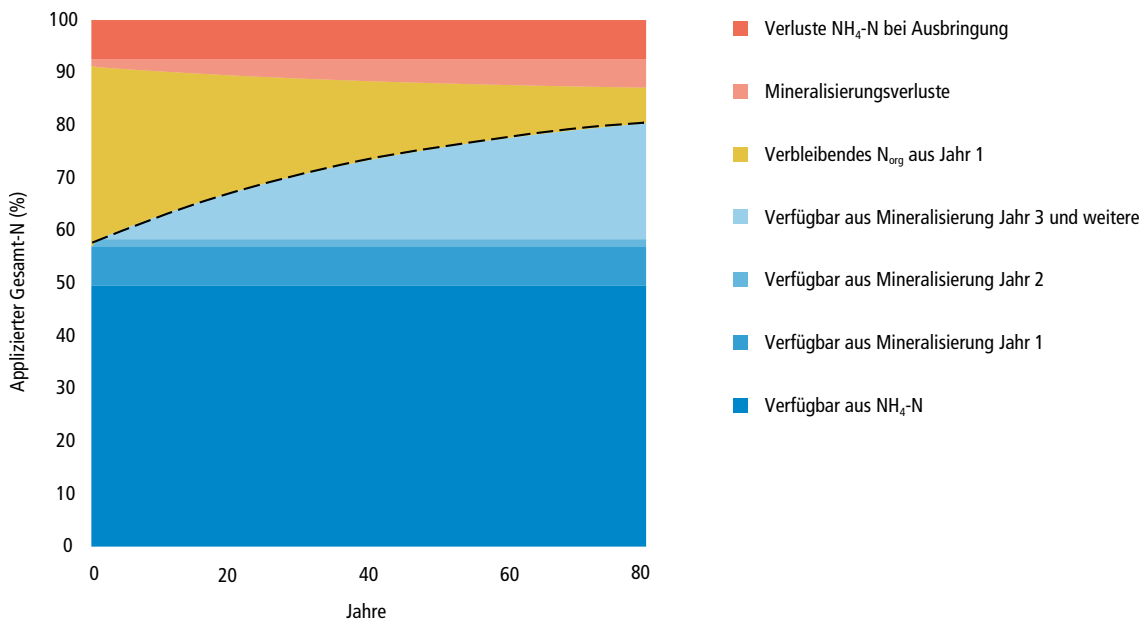


Abb. 1 | Modelllauf für eine Gärgülle mit 57 % $\text{NH}_4\text{-N}$ -Anteil für Szenario A (mittlere N_{org} -Mineralisierungsraten). Die schwarz gestrichelte Linie zeigt die Veränderung der N-Ausnutzungseffizienz über 80 Jahre bei wiederholter Gärgülleapplikation bezogen auf die N-Menge der Düngergabe in einem Anwendungsjahr.

benden N_{org} aus Jahr 1 mit 2 % nur noch marginal zur gesamten N-Verfügbarkeit bei (0,6 % des Gesamt-N). Durch die wiederholte Ausbringung wird der Vorrat an mineralisierbarem organischen N jährlich erhöht, womit sich über längere Zeitperioden ein grosses Mineralisierungspotenzial ergibt.

Die verbleibende Menge an N_{org} aus dem Ausbringungsjahr nimmt durch die jährliche Mineralisierung stetig ab. Während nach 20 Jahren noch knapp 23 % vorhanden sind, verbleiben in diesem Modellverlauf nach 80 Jahren noch 7 % des N_{org} aus dem ersten Ausbringungsjahr im Boden, der weiter mineralisiert werden kann. Ein stabiles Gleichgewicht, d. h. konstante Nachlieferungsraten aus der Mineralisierung, ergäbe sich erst dann, wenn der N_{org} aus dem ersten Jahr eine verschwindend kleine Grösse erreicht hat.

In Tabelle 2 sind die errechneten N-Verfügbarkeiten für einen Zeitraum von 20, 40, 60 und 80 Jahren für die drei Gärgüllevarianten und die beiden Abbauszenarien von N_{org} dargestellt. Es zeigt sich, dass die N-Verfügbarkeit vor allem zu Beginn der Ausbringung stark vom Anteil des $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehaltes abhängig ist. So werden in Gärgüllen mit einem geringen $\text{NH}_4\text{-N}$ -Anteil nach 20 Jahren effektiv nur 47–58 % des Gesamt-N pflanzenverfügbar, während es in Gärgüllen mit einem hohen $\text{NH}_4\text{-N}$ -Anteil 68–74 % sind. Durch die beständige Mineralisierung von verbleibendem und jährlich neu eingebrachtem N_{org} vermindern sich diese Unterschiede über die Zeit jedoch zusehends. Auch die beiden Szenarien mit ihren jeweils

unterschiedlichen Mineralisierungsraten haben einen wichtigen Einfluss auf die N-Verfügbarkeit. In Gärgüllen mit geringen $\text{NH}_4\text{-N}$ -Anteilen ist der relative Anteil an N_{org} naturgemäss grösser, womit auch mehr N_{org} potenziell mineralisiert werden kann.

Zu erwartende N-Verfügbarkeit in der Praxis

Die Relevanz der zeitlich verzögerten N_{org} -Mineralisierung soll beispielhaft an einer Gärgülleapplikation von $150 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ gezeigt werden: Die Gülle hat einen $\text{NH}_4\text{-N}$ -Anteil von 57 %, das heisst, es werden 86 kg N als $\text{NH}_4\text{-N}$ und 64 kg N als N_{org} ausgebracht. Bei der Ausbringung gehen 13 % des $\text{NH}_4\text{-N}$ (entspricht 11 kg N) als NH_3 verloren. Somit verbleiben 139 kg N auf dem Feld. Davon können im ersten Jahr unter optimalen Bedingungen 62 % (87 kg) genutzt werden. Die NAE bezogen auf die ausgebrachten 150 kg N ist 57 %. Wird die Gärgülmengung nun jedes Jahr wiederholt appliziert, erhöht sich der N_{org} -Vorrat im Boden. Aus diesem grösser werdenden Vorrat wird jedes Jahr eine kleine Menge mineralisiert (20 % im Ausbringungsjahr, 5 % im ersten Folgejahr und 2 % in den weiteren Folgejahren [Szenario A]). Nach 20 Jahren steigt damit die NAE auf 67 %, nach 40 Jahren auf 73 %. Nach 80 Jahren werden effektiv 80 % (120 kg) der ausgebrachten 150 kg N ausgenutzt.

Diese Modellrechnung setzt beste landwirtschaftliche Praxis voraus, das heisst eine möglichst vollständige Bodenbegrünung mit Zwischenfrüchten und die Ausbringung der Gärgülle in mehreren Gaben mit Schlepp-

schlauchtechnologie und zu optimalen Zeitpunkten. Im Modell wird von einer Auswaschung von 15 % des aus dem N_{org} -Vorrat mineralisierten N ausgegangen. Werden die Verluste auf 30 % verdoppelt, verringert sich die NAE in unserem Beispiel (Szenario A) nur geringfügig: nach 20 Jahren auf 64 %, nach 40 Jahren auf 69 % und nach 80 Jahren auf 75 %. Eine Verdoppelung der NH_3 -N-Verluste bei der Ausbringung fällt etwas stärker ins Gewicht und verringert die NAE auf Werte von 59 %, 66 % und 73 % nach 20, 40 und 80 Jahren.

Abschätzung der NAE einer spezifischen Gärgüllequalität
Ein pragmatischer Ansatz, die NAE von flüssigem Gärgut anhand von zwei einfach zu bestimmenden analytischen Parametern abzuleiten, beruht auf folgender Berechnung:

$$NAE (\%) = \frac{(NH_4 - N * 0.87) + (N_{org} * \text{Faktor})}{N_{tot}} * 100$$

- NAE = N-Ausnutzungseffizienz in % der applizierten N-Menge in einem Anwendungsjahr
- NH_4 -N = Konzentration NH_4 -N (löslicher N) in g kg^{-1} Trockensubstanz
- N_{org} = Konzentration N_{org} ($N_{org} = N_{tot} - NH_4$ -N) in g kg^{-1} Trockensubstanz
- Faktor = Ausnutzungsfaktor von N_{org} nach wiederholter Gülleapplikation nach x Jahren
- N_{tot} = Gesamt-N der Gülle in g kg^{-1} Trockensubstanz

Hierbei wird davon ausgegangen, dass 13 % des NH_4 -N durch Ausbringungsverluste verloren gehen (Multiplikation von NH_4 -N mit dem Faktor 0,87). Die Ausnutzung von N_{org} hängt vom Mineralisierungsverlauf (z. B. Szenario A oder Szenario B), von den effektiven Verlusten des aus N_{org} mineralisierten N und vom betrachteten Zeitraum ab. Nach 80 Jahren war in unserem Modell in keinem Szenario ein Gleichgewicht zwischen Zufuhr und Mineralisierung von N_{org} erreicht.

Tab. 2 | N-Verfügbarkeit als Summe von NH_4 -N und mineralisiertem N_{org} über einen Zeitraum von 80 Jahren für drei in der Schweiz typische Gärgüllequalitäten und zwei Szenarien mit unterschiedlichen N_{org} -Mineralisierungsraten (Tab. 1).

	N-Verfügbarkeit in % Gesamt-N			
	20 Jahre	40 Jahre	60 Jahre	80 Jahre
39 % NH_4-N				
Szenario A	58	67	74	78
Szenario B	47	54	60	64
57 % NH_4-N				
Szenario A	67	73	78	80
Szenario B	59	64	68	71
72 % NH_4-N				
Szenario A	74	78	81	83
Szenario B	68	72	74	77

Die in Tabelle 3 gezeigten N_{org} -Ausnutzungsfaktoren beziehen sich auf die beiden N_{org} -Mineralisierungsszenarien A und B und N-Verluste aus der N_{org} -Mineralisierung von 15 % und 30 %. Sie wurden auf Basis des oben beschriebenen Modells abgeleitet. Nach 80 Jahren werden N_{org} -Ausnutzungsraten von mindestens 43 % und maximal 72 % erreicht.

Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der Modellrechnungen dieser Studie zeigen klar, dass die NAE von Gärgülle nur über einen sehr langen Zeitraum von mehr als 80 Jahren realistisch abgeschätzt werden kann, wenn eine jährliche Gülleausbringung, wie dies in der Praxis üblich ist, vorausgesetzt wird. Nach Berücksichtigung von N-Verlusten bei der Ausbringung wird für eine typische Schweizer Gärgülle landwirtschaftlicher Herkunft eine NAE von rund 80 % unter optimalen und 70 % bei langsamerer N_{org} Mineralisierung oder höheren Verlusten aus mineralisiertem N_{org} erreicht.

Tab. 3 | Ausnutzungsfaktoren des N_{org} in Gärgülle auf Basis unterschiedlicher Modellannahmen und -laufzeiten. Szenario A und B: siehe Tabelle 1; Anteil N-Verluste aus mineralisiertem N_{org} von 15 % und 30 %.

	Szenario A (mittel)			Szenario B (langsam)		
	20	40	80	20	40	80
Verlust 15 %	0,40	0,55	0,72	0,22	0,34	0,53
Verlust 30 %	0,33	0,45	0,59	0,18	0,28	0,43

Riassunto

Efficienza dello sfruttamento dell'azoto nei liquami di biogas

La fermentazione dello stallatico e di altri materiali organici è diventata sempre più importante negli ultimi anni. Il processo di fermentazione produce biogas (metano) e aumenta la proporzione di composti azotati facilmente reperibili nel liquame di fermentazione. Finora sono state effettuate poche ricerche sul valore come fertilizzante del liquame di fermentazione applicate alle condizioni svizzere, in particolare per quanto riguarda la disponibilità di azoto nel lungo termine. Sulla base di un modello numerico, abbiamo valutato l'efficienza dello sfruttamento dell'azoto del liquame di fermentazione comunemente presente in Svizzera. A seconda della qualità del liquame di fermentazione, l'efficienza dello sfruttamento dell'azoto varia tra il 64 e l'83 % nell'arco di 80 anni. La mineralizzazione dell'azoto organico negli anni successivi contribuisce in modo sostanziale all'elevata efficienza di sfruttamento dell'azoto in applicazioni ripetute.

Summary

Nitrogen-use efficiency of biogas digestate

The digestion of farmyard manure and other organic materials has become increasingly important in recent years. The digestion process produces biogas (methane), and increases the proportion of easily available nitrogen compounds in the digestate produced. To date, there has been little research on the fertiliser value of digested farmyard manure that is of relevance to Swiss conditions, especially with regard to long-term nitrogen availability. We used a numerical model to estimate the nitrogen-use efficiency (NUE) of digestates common in Switzerland. Depending on the duration of the model and the quality of the digestate, NUEs of 64 % to 83 % are achieved within 80 years. The mineralisation of organic nitrogen in subsequent years of application contributes substantially to the high NUE resulting from repeated application.

Key words: digestate, nitrogen use efficiency, biogas, modelling.

Literatur

- Alburquerque J. A., de la Fuente C. & Bernal M. P., 2012. Chemical properties of anaerobic digestates affecting C and N dynamics in amended soils. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **160**, 15–22.
- Fouda S., von Tucher S., Lichti F. & Schmidhalter U., 2013. Nitrogen availability of various biogas residues applied to ryegrass. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **176** (4), 572–584.
- Gunnarsson A., Bengtsson F. & Caspersen S., 2010. Use efficiency of nitrogen from biodigested plant material by ryegrass. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **173** (1), 113–119.
- Gutser R., Ebertseder T., Weber A., Schraml M. & Schmidhalter U., 2005. Short-term and residual availability of nitrogen after long-term application of organic fertilizers on arable land. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **168** (4), 439–446.
- Häni C., Sintermann J., Kupper T., Jocher M. & Neftel A., 2016. Ammonia emission after slurry application to grassland in Switzerland. *Atmospheric Environment* **125**, 92–99.
- Klausner S. D., Kanneganti V. R. & Bouldin D. R., 1994. An approach for estimating a decay series for organic nitrogen in animal manure. *Agronomy Journal* **86** (5), 897–903.
- Mandaliev P. & Schleiss K., 2016: Kompostier- und Vergärungsanlagen. Erhebung in der Schweiz und Liechtenstein. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern.
- Möller K. & Müller T., 2012. Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: A review. *Engineering in Life Sciences* **12** (3), 242–257.
- Nkoa R., 2014. Agricultural benefits and environmental risks of soil fertilization with anaerobic digestates: a review. *Agronomy for Sustainable Development* **34** (2), 473–492.
- Richner W., Flisch R., Mayer J., Schlegel P., Zähler M. & Menzi H., 2017. Eigenschaften und Anwendung von Düngern. In: Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD 2017). *Spezialpublikation, Agrarforschung Schweiz*, **8** (6), 4/1–4/23.
- Rigby H. & Smith S., 2013. Nitrogen availability and indirect measurements of greenhouse gas emissions from aerobic and anaerobic biowaste digestates applied to agricultural soils. *Waste Management* **33** (12), 2641–2652.
- Schröder J., Uenk D. & Hilhorst G., 2007. Long-term nitrogen fertilizer replacement value of cattle manures applied to cut grassland. *Plant and Soil* **299** (1–2), 83–99.
- Webb J., Sørensen P., Velthof G., Amon B., Pinto M., Rodhe L., Salomon E., Hutchings N., Burczyk P. & Reid J., 2013. An assessment of the variation of manure nitrogen efficiency throughout Europe and an appraisal of means to increase manure-N efficiency. *Advances in Agronomy* **119**, 371–442.