

Die Stickstoffverfügbarkeit von entwässerten Abwassersubstraten

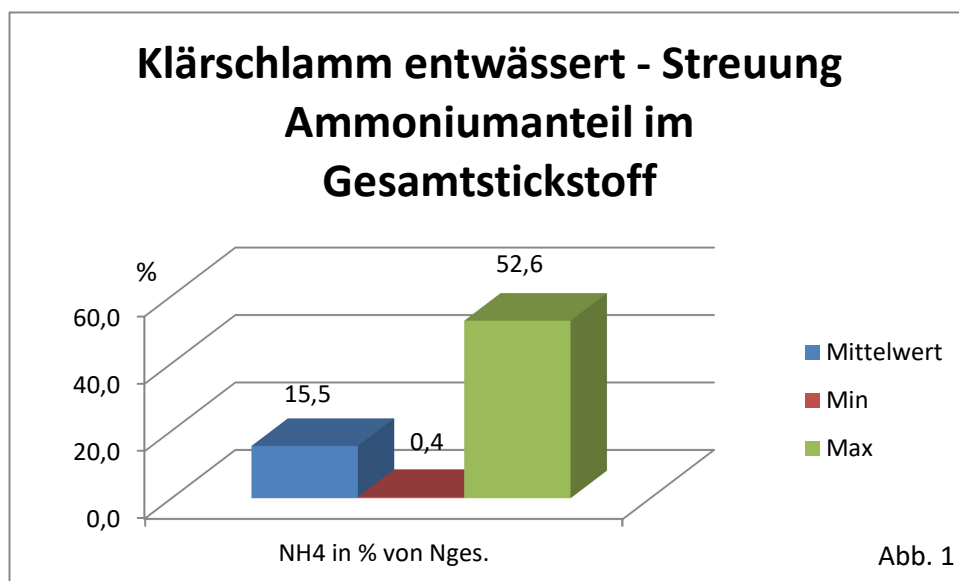
Mit Klärschlamm als Substrat aus der kommunalen Abwasserreinigung werden dem Boden bei der landwirtschaftlichen Nutzung als Düngemittel sowohl Mineralstoffe als auch organische Substanz zugeführt. Die Mineralstoffe dienen dabei der Pflanzenernährung und die organische Substanz dient hauptsächlich der Humusbildung und damit der Bodenverbesserung. Während die Gehalte an Phosphor, Kali, Magnesium und Spurenelementen zu 100 % auf den Bedarf der Kulturpflanzen angerechnet werden können, ist dies bei Stickstoff differenziert zu betrachten.

Stickstoff liegt in Abwassersubstraten in unterschiedlicher Menge und Bindungsform vor. Ein Teil ist in organischer Substanz festgelegt, der andere liegt als Ammonium-Stickstoff z.T. pflanzenverfügbar vor. In der Literatur finden sich unterschiedliche Angaben über die kurz- und langfristige Pflanzenverfügbarkeit des Gesamtstickstoffs aus Abwassersubstraten. Dies ist zum einen darauf zurückzuführen, dass sich verschiedene Substrate je nach Abwasserreinigungstechnik und Behandlungsverfahren in ihrer stofflichen Zusammensetzung stark unterscheiden. Zum anderen wird die Abbaubarkeit der organischen Substanz unterschiedlich beurteilt.

Im Nährstoffvergleich, wie er für Stickstoff nach § 8 DüV durchzuführen ist, soll bei der Düngung mit Klärschlamm der gesamte im Substrat enthaltene Stickstoff angerechnet werden. Die Länder können aber unvermeidliche Verluste oder erforderliche Zuschläge berücksichtigen. Da ein Teil des in den Substraten enthaltenen Stickstoffes in die organische Bodensubstanz als Humus eingelagert wird, steht dieser auch langfristig nicht für die Pflanzenernährung zur Verfügung. Es sollte also eine an der tatsächlich verfügbaren Stickstoffmenge orientierte Methode zur Berechnung der Höhe des verfügbaren Anteils am Gesamt-Stickstoff definiert werden.

Ammonium-Gehalt in Abwassersubstraten

Eine Auswertung von 147 Analysen aus Abwasserreinigungsanlagen im Bundesgebiet, deren Klärschlämme von QDR-Mitgliedsunternehmen landwirtschaftlich verwertet wurden, zeigt, dass der



Gehalt an Ammonium bei den Kläranlagen breit gestreut ist (Abb. 1).

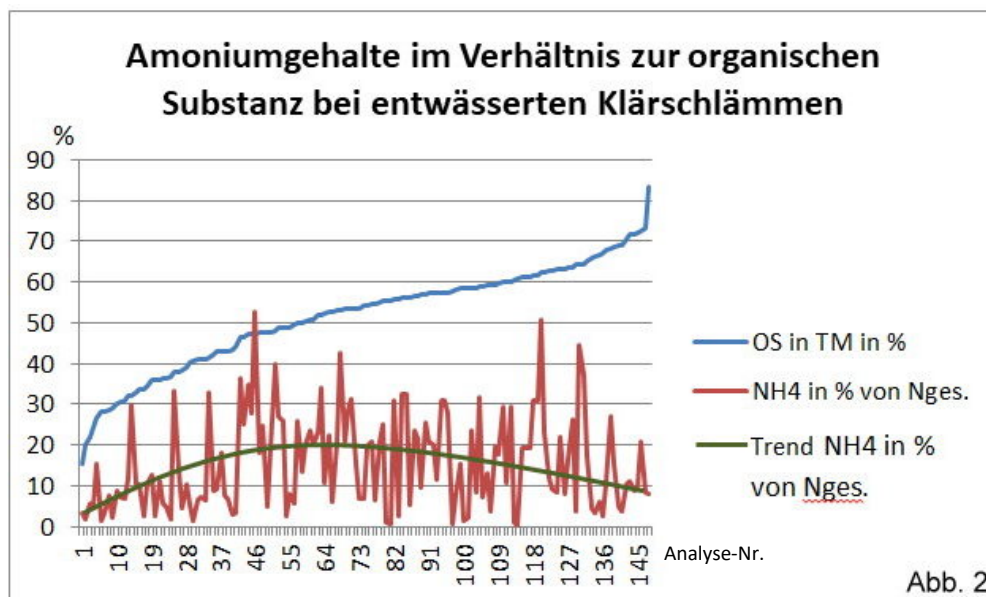
Bei einem Mittelwert von rund 15 % in der Trockenmasse gibt es einerseits Substrate mit einem Gehalt an Ammonium von nahezu Null Prozent und andererseits Substrate mit mehr als 50 % in der Trockenmasse. Damit wird schon deutlich, dass eine pauschale Festsetzung der Stickstoffausnutzung des Gesamtstickstoffs nicht sinnvoll ist. Eine einheitliche Festsetzung der N-Verfügbarkeit für Klärschlamm ist auch nicht nötig, da alle Klärschlämme regelmäßig analysiert werden und deshalb eine detaillierte Bewertung für jedes Substrat bzw. für jede Kläranlage möglich ist.

Gehalt an organischer Substanz in Abwassersubstraten

Die starken Abweichungen der Nährstoffgehalte sind u.a die Folge der jeweiligen Abwasserreinigungstechnik. Ist eine Kläranlage z.B. mit einem Faulturm ausgestattet, so findet damit ein weitergehender Abbau der organischen Substanz statt. In diesem Fall ist der Anteil der organischen Substanz in der Trockenmasse geringer. Aber auch bei dem Vergleich von Kläranlagen mit Faultürmen untereinander gibt es Unterschiede in der Intensität des anaeroben Abbaus in Abhängigkeit von der Auslastung der Kläranlagen. Kläranlagen mit hoher Auslastung müssen häufig die Verweilzeiten im Faulturm verkürzen, so dass der Abbau der Organik in geringerem Maße erfolgt als bei längerer Verweilzeit. Resultat sind unterschiedliche Gehalte an organischer Substanz in der Trockenmasse trotz gleicher Abwasserreinigungstechnik.

Dies trifft auch für alle anderen Behandlungsverfahren zu. Das Belebungsverfahren wird mit unterschiedlicher Dauer und Intensität der Belüftung durchgeführt. Dies schlägt sich dementsprechend in unterschiedlichen Analyseergebnissen nieder. Kläranlagen mit den höchsten Gehalten an organischer Substanz sind i. d. R. Abwasserteichanlagen. Hier liegen die Höchstwerte bei mehr als 80 % in der TM. Bei aerober und anschließender anaerober Faulung in Kombination mit einer Kalkfällung bzw. -stabilisierung kann der Anteil der organischen Substanz auf bis zu 15 % in der Trockenmasse sinken.

Die Auswertung der Analysen von 147 Kläranlagen aus dem Bundesgebiet zeigt, dass sowohl



Substrate mit besonders geringem Gehalt an Organik in der Trockenmasse (< 30 %) als auch solche mit besonders hohem Organik-Gehalt (> 70 %) mit 3 – 20 % einen eher niedrigen prozentualen Anteil an Ammonium am Gesamtstickstoff aufweisen, während Substrate mit mittlerem Gehalt organischer

Substanz (35 – 60 %) sowohl tendenziell höhere Ammoniumgehalte (5 – 50 %) als auch größere Abweichungen bei den Einzelanalysen je nach Kläranlage aufweisen. Die Analyseergebnisse in Abb. 2 wurden aufsteigend nach dem Gehalt der organischen Substanz sortiert (blaue Kurve) und die dazugehörigen Anteile von Ammonium am Gesamtstickstoff (rote Kurve) dargestellt. Da der Gehalt an N_{ges} mit steigendem Anteil der organischen Substanz in der Trockenmasse zunimmt, werden auch die absoluten Abweichungen im Ammoniumgehalt mit zunehmendem Gehalt an organischer Substanz größer.

Pauschale Anrechnung der N-Verfügbarkeit

Abb. 3 zeigt zwei Einzelanalysen im Vergleich. Bei der ersten Kläranlage (KA 1) liegt der Anteil von Ammonium-Stickstoff (NH_4) bei 50 % und bei dem zweiten Beispiel (KA 2) bei 0,8 %. Bei einer pauschalen Bewertung des verfügbaren Stickstoffgehaltes in Höhe von z. B. 30 % würden bei einer Düngung in Höhe von 5 t TM/ha im ersten Fall (KA 1) nur 86 kg angerechnet, obwohl schon alleine an NH_4 tatsächlich 140 kg verfügbar wären. Es würden also 54 kg zu viel gedüngt. Bei KA 2 müssten 72 kg N aus der Klärschlamm Düngung angerechnet werden, obwohl tatsächlich nur 2 kg $\text{NH}_4\text{-N}$ verfügbar wären. Ohne Berücksichtigung des mineralisierbaren Anteils aus der Organik würden zur Ertragsbildung noch ca. 50 kg N fehlen.

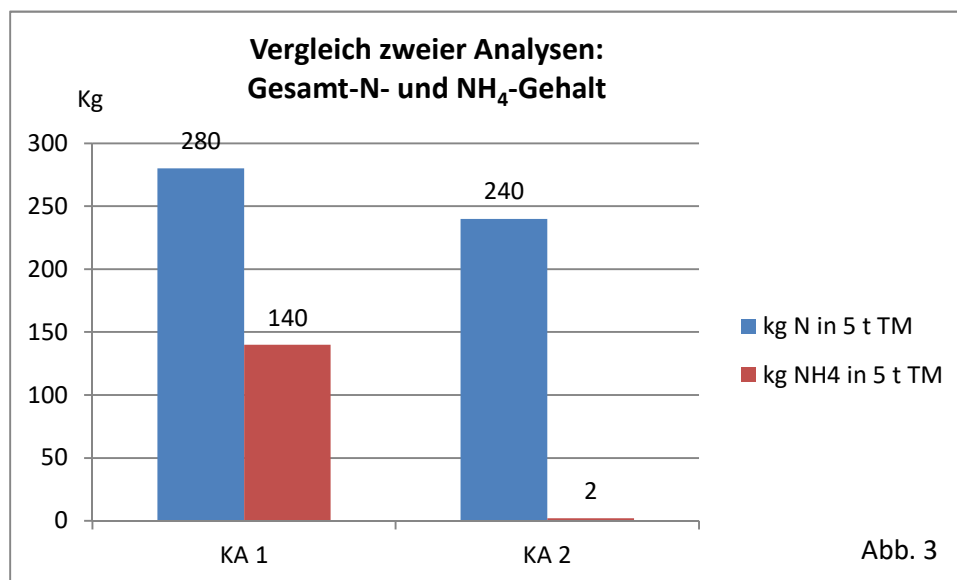


Abb. 3

Vor dem Hintergrund der großen Abweichungen sowohl bei dem Gehalt an NH_4 als auch bei dem Anteil der organischen Substanz in der Trockenmasse kann eine pauschale Anrechnung der N-Verfügbarkeit von der tatsächlichen Verfügbarkeit stark abweichen. Die tatsächliche Verfügbarkeit von Stickstoff sollte aufgrund der Analyseergebnisse ermittelt werden, um zu vermeiden, dass mehr Stickstoff verfügbar ist, als aufgrund einer pauschalen Bewertung ermittelt wurde, oder dass mehr verfügbarer Stickstoff errechnet wurde, als zur Ertragsbildung tatsächlich vorhanden ist.

Anrechnung von Ammonium-Stickstoff

Zur Beurteilung der Verfügbarkeit des Stickstoffgehaltes sollte zunächst der Ammoniumgehalt der jeweils aktuellen Analyse herangezogen werden. Ein Teil dieser Ammoniummenge geht bei der Ausbringung verloren, zusätzlich wird ein Teil von Bodenmikroorganismen aufgenommen und festgelegt. Döhler et al. [4] gehen bei abgepressten Gärresten aus Biogasanlagen (die mit entwässerten Klärschlämmen gut vergleichbar sind) von Verlusten in Höhe von 70 % aus (Abb. 4). Für Rindermist geben Frick et al. [7] Ammoniak-Verluste von 60 – 70 % an. Nach Hersener et al. [8] können die Verluste sogar bis zu 100 % betragen; im Mittel gehen sie bei Rindermist mit 25 % TM von 50 % aus. Diese Verluste lassen sich durch sofortige Einarbeitung, die nach novellierter Düngeverordnung auch für entwässerte Klärschlämme verpflichtend ist, um ca. 40 % reduzieren [9]. Setzt man die NH_4 -Verluste bei entwässertem Klärschlamm analog zu Rindermist mit rund 50 % an

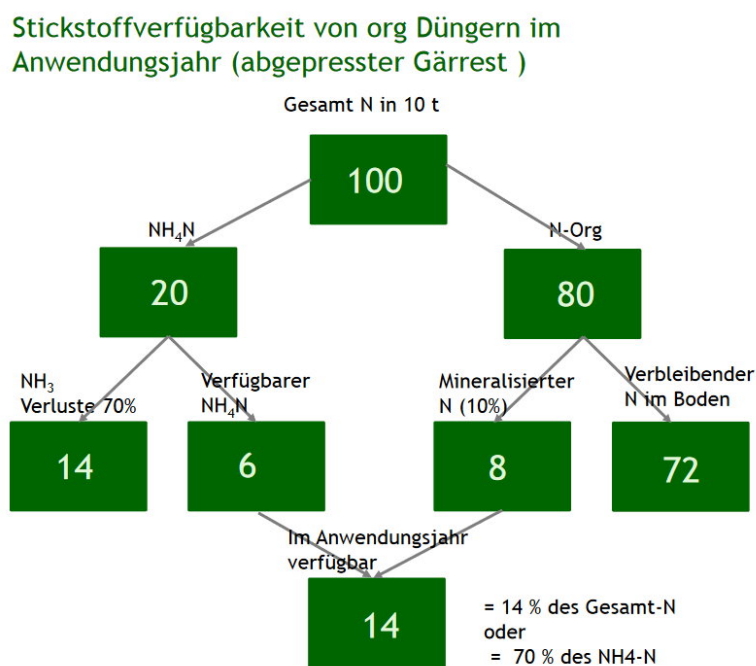


Abb. 4

und geht bei sofortiger Einarbeitung von einer Reduzierung von 40 % aus, so ergeben sich aus der Differenz Verluste in Höhe von 10 %. In der Praxis dürften die Verluste etwas höher liegen, zumal der Anteil, der aus dem freien Ammonium im Boden von Mikroorganismen festgelegt wird, hierbei unberücksichtigt bleibt. Bei einer Begrenzung der NH_4 -Verluste auf 10 % wird vermieden, dass in der Praxis tatsächlich mehr Ammonium verfügbar (und damit auswaschungsgefährdet) ist, als theoretisch errechnet wird.

Anrechnung von Stickstoff aus der organischen Substanz

Zusätzlich zum Ammonium-Stickstoff wird durch den mikrobiellen Abbau der organischen Substanz Stickstoff freigesetzt. Die Höhe dieser Freisetzung hängt einerseits von exogenen Faktoren, wie Wasser-, Luft- und Tongehalt, Temperatur und pH-Wert des Bodens, der Kulturart etc. ab und andererseits von der Zusammensetzung der organischen Substanz selbst. Die Pflanzenverfügbarkeit von Stickstoff aus dieser Mineralisierung wird andererseits durch die mikrobielle Immobilisation und durch die Humifizierung begrenzt. Stickstoff aus der leicht umsetzbaren organischen Substanz wird größtenteils mikrobiell festgelegt, also für die Bildung von Mikroorganismen verwendet. Bei der

Humifizierung werden aus den Zersetzungsprodukten der Mineralisierung Huminstoffe gebildet. Dabei wird Stickstoff im Bodenhumus langfristig festgelegt. Auch die Humifizierungsprozesse sind sowohl von der Zusammensetzung des organischen Ausgangsmaterials als auch von den exogenen Faktoren abhängig [2].

In der Literatur ist die Abbaustabilität organischer Ausgangsstoffe folgendermaßen gegliedert: Zucker, Stärke, Proteine < Proteide < Pektine < Zellulose < Lignine < Wachse < Harze < Gerbstoffe. Die organische Substanz von Abwassersubstrat besteht im Wesentlichen aus abgestorbenen Mikroorganismen. Es handelt sich also um zelluläre Biomasse ohne Lignin-, Wachs- oder Harzverbindungen. In Bezug auf die Substrat-Eigenschaften ist die N-Freisetzung organischer Düngemittel nach Gutser et al. [2] grundsätzlich abhängig vom N-Gesamt-Gehalt, dem NH_4 -Gehalt, dem C/N-Verhältnis und der Abbaustabilität der organischen Substanz. Unter Berücksichtigung dieser Faktoren und auf der Grundlage von Literaturdaten und Experimenten haben sie die N-Verfügbarkeit organischer Dünger als Mineraldüngeräquivalente (MDÄ) bewertet. Danach sind bei entwässertem Klärschlamm im Jahresverlauf 15 – 30 % vom $\text{N}_{\text{ges.}}$ verfügbar, wobei der Anteil von NH_4 darin bereits enthalten ist.

Die Abbaubarkeit der organischen Substanz und die Verfügbarkeit von Stickstoff werden bei entwässertem Klärschlamm in der Literatur überwiegend mit der von Rindermist und festen Gärresten in etwa gleichgesetzt. So wird in Tabelle 1 nach Reinold [3] die Abbaubarkeit der

Organischer Dünger	Stabilitätsfaktor (nach VDLUFA-Humusbilanzierung)
Stallmist, verrottet	1
Gärprodukt fest aus Kofermentation	1
Fertigkompost	1,45
Frischkompost	1,25
Klärschlamm flüssig	0,7
Klärschlamm entwässert	1

organischen Substanz als Stabilitätsfaktor auf der Grundlage der VDLUFA-Humusbilanzierungsmethode bei diesen Düngern mit 1 bewertet. Bei Stallmist kann dieser Stabilitätsfaktor je nach Rottegrad und je nach Strohanteil abweichen. Bei festen Gärresten und bei Klärschlämmen ist die Abbaubarkeit der organischen Substanz aber erstens sehr gut vergleichbar und zweitens sehr konstant, weil beide Substrate hauptsächlich aus abgestorbener Bakterienbiomasse bestehen.

Es gibt also sowohl zwischen festen Gärresten und Klärschlämmen als auch zwischen Klärschlämmen aus verschiedenen Kläranlagen nahezu keine Abweichungen hinsichtlich der Abbaubarkeit ihrer

organischen Substanz. Große Unterschiede gibt es nur bei dem Anteil der organischen Substanz in der Trockenmasse, der wie Abb. 2 zeigt, bei verschiedenen Kläranlagen zwischen 15 % und 85 % liegt.

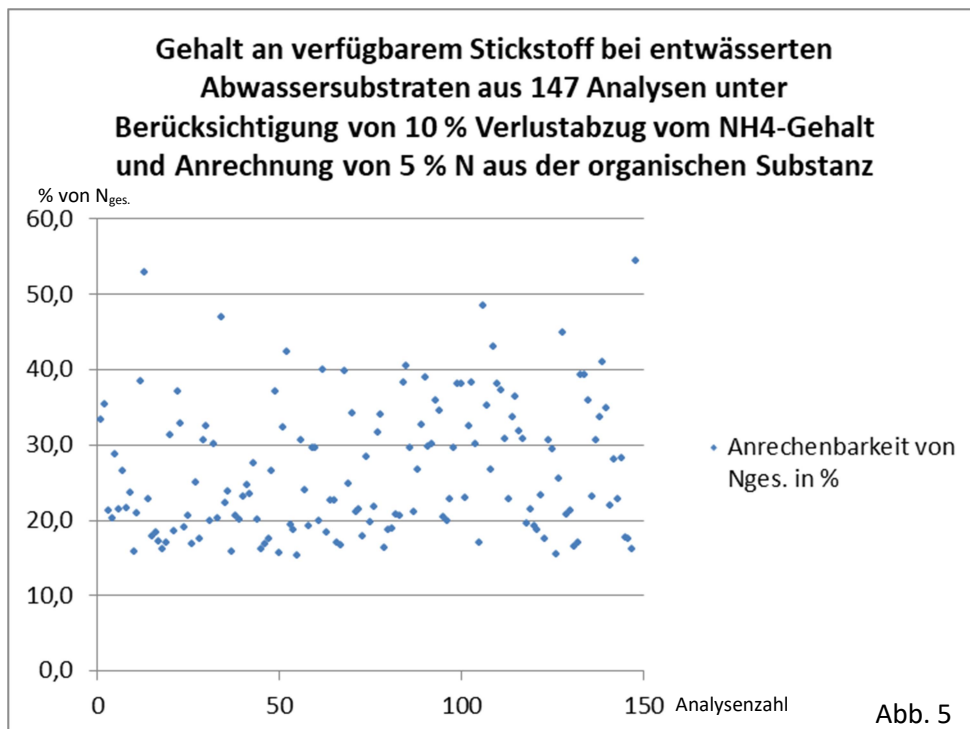
Im Rahmen einer Auswertung von mehr als 70 Studien zur Abbaubarkeit von organischer Substanz wird deutlich, dass für die Umsetzung von Dünger-Kohlenstoff und –Stickstoff in Humus-Kohlenstoff bzw. Humus-Stickstoff das resultierende C/N-Verhältnis aus dem C/N-Verhältnis des Düngers und dem des Bodens maßgebend ist [11]. Danach zeigen grundsätzlich N-reichere organische Substrate - wie Stallmist und Gründüngung - eine bessere Leistung im Humusaufbau, als Substrate mit einem weiten C/N-Verhältnis. Die Ergebnisse legen nahe, dass bei solchen Düngern mehr Stickstoff in organischer Bodensubstanz festgelegt wird, als bisher angenommen wurde.

Döhler et al. [4] schätzen den gesamten mineralisierbaren Anteil des organisch gebundenen Stickstoffs bei abgepressten Gärresten auf 10 %. Die Landwirtschaftskammer Oberösterreich veranschlagt die Wirkung des organisch gebundenen Stickstoffs aus Gülle auf 3-6 % im ersten Jahr, langfristig wird für bis zu 10 Jahre mit 30 – 50 % gerechnet [5]. Die sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft erläutert die Berechnungsschritte zur Stickstoffanrechnung bei Wirtschaftsdüngern [6]. Sie beziffert den Faktor zur Berechnung der N-Freisetzung aus der organischen Komponente für organische NP-Dünger, wie Klärschlamm, mit 0,05. Für Gärreste und separierte Gülle setzen Gutser et al. 2-3 % von $N_{ges.}$ an, die jährlich mineralisiert werden können [2]. Dies entspricht 3-5 % des organisch gebundenen Stickstoffs. Nach Döhler et al. [10] beträgt die N-Nachlieferung aus Gärresten 3 % des organisch gebundenen Stickstoffs pro Jahr. Bis zur Novelle der Düngeverordnung im Juni 2017 wurde im nördlichen Rheinland-Pfalz bei Klärschlämmen der verfügbare Anteil auf Vorschlag des DLR mit fünf Prozent von $N_{ges.}$ veranschlagt.

Vorschlag zur Berechnungsmethode

Wenn der Anteil aus organisch gebundenem Stickstoff für entwässerte Klärschlämme auf 5 Prozent festgesetzt wird, ist gewährleistet, dass der jährlich verfügbare Anteil an verfügbarem Stickstoff aus der organischen Substanz nicht unterschätzt wird. Damit wäre auch sichergestellt, dass es nicht zu einer Anreicherung von Stickstoff im Boden kommen kann, womit die Gefahr einer Auswaschung in das Grundwasser vermieden wird.

Zur Bestimmung des verfügbaren Ammonium-Gehaltes sollten, wie oben begründet, im ersten Jahr 90 % des NH_4 -Gehaltes festgesetzt werden. Zur Bestimmung des verfügbaren Anteils aus der organischen Substanz sollten im ersten Jahr und in zwei Folgejahren 5 Prozent des organisch gebundenen Stickstoffs, also aus der Differenz von $N_{ges.}$ und NH_4 , zugrunde gelegt werden ($N_{org.} = N_{ges.} - NH_4$). Bezogen auf den Stickstoffgehalt in kg/t TM lässt sich also die Formel zur Berechnung des



verfügbaren Stickstoffs wie folgt formulieren:

Im ersten Jahr: $\text{NH}_4 * 0,9 + \text{N}_{\text{org.}} * 0,05$

Im zweiten Jahr: $+ \text{N}_{\text{org.}} * 0,05$

Im dritten Jahr: $+ \text{N}_{\text{org.}} * 0,05$

Gesamt: Summe

oder für 3 Jahre: $\text{NH}_4 * 0,9 + \text{N}_{\text{org.}} * 0,15$

Die Auswertung aus 147 Kläranlagen der QDR-Mitglieder aus dem Bundesgebiet (Abb. 5) zeigt, dass bei dieser Berechnungsmethode die Werte erwartungsgemäß starken Abweichungen unterliegen. Der niedrigste Wert für die Summe in drei Jahren beträgt dann 15,8 % von $\text{N}_{\text{ges.}}$, der höchste Wert liegt bei 54,5 %. Diese Auswertung stimmt mit den allgemeinen Ergebnissen von Gutser et al. [2] sehr gut überein, ermöglicht aber dabei eine individuelle Bewertung des jeweiligen Substrates auf der Grundlage der aktuellen Analyse.

QDR e.V. im Mai 2018

Literatur:

[1] Gutser, R.; Ebertseder, T.: Grundregeln der guten fachlichen Praxis für den Einsatz organischer Düngemittel. In: Bundesarbeitskreis Düngung (BAD) (Hrsg.): Nährstoffmanagement, Bodenfruchtbarkeit und nachhaltige Landwirtschaft. BAD, Frankfurt: 43 – 59, 2005

[2] R. Gutser et al., Stickstoffeffiziente und umweltschonende Düngung in: Emissionen landwirtschaftlich genutzter Böden, KTBL-Schrift 483, 2010

[3] Dr. J. Reinold: Mobilität von Stickstoff aus organischen Düngemitteln im Boden und deren Humusreproduktionsleistung, Tagung der Georg-August-Universität Göttingen, 3. 7.2014 Hannover

[4] Helmut Döhler, SKW-Fachtagungen "Düngung 2016": Düngung von Gülle und Gärrückständen unter den Vorzeichen der neuen Düngeverordnung

[5] Christian Krumphuber, Boden-Wasser-Schutz-Beratung im Auftrag der Landwirtschaftskammer Oberösterreich, (<https://www.bwsb.at/?+Wirtschaftsduenger>), 2015

[6] Wirksamkeit organischer Dünger: Berechnung der pflanzenbaulichen Wirksamkeit der Nährstoffe organischer Dünger, Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Fachbereich Pflanzliche Erzeugung, Dresden, Mai 2007

[7] Frick R., Menzi H., Katz P., Ammoniakverluste nach der Hofdüngeranwendung. Stark unterschiedliche Verluste je nach Bedingungen. FAT-Bericht Nr. 486, 10 S., 1996

[8] Hersener J.-L., Meier U., Dinkel F.: Ammoniakemissionen aus Gülle und deren Minderungsmaßnahmen unter besonderer Berücksichtigung der Vergärung, Wiesendangen, 2002

[9] Frick R., Menzi H., Hofdüngeranwendung: Wie Ammoniakverluste vermindern? Auch einfache Maßnahmen wirken. FAT-Bericht Nr. 496, 12 S., 1997.

[10] Helmut Döhler, Sven Grebe, Uwe Häußermann, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Gülzower Fachgespräche, Band 32, Tagungsband „Biogas in der Landwirtschaft – Stand und Perspektiven“, Düngewirkung von Gärresten, Weimar, 2009

[11] Brock, C.; Dannehl, T.: Justus-Liebig-Universität Gießen, Möller, D.; Blumenstein, B.: Universität Kassel, Projektbericht „Sicherung der Humusversorgung mit Grün- und Strohdüngung“, 2016