

Ammoniakverluste nach der Anwendung von Mist

Harald MENZI, Martin KELLER, Peter KATZ, Matthias FAHRNI und Albrecht NEFTEL, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau (FAL), Institut für Umweltschutz und Landwirtschaft (IUL), Liebefeld, CH-3003 Bern
Rainer FRICK, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (FAT), CH-8356 Tänikon TG

Ein Viertel der von schweizerischen Nutztieren ausgeschiedenen Nährstoffe wird als Mist gesammelt und verwertet. Über die Ammoniakverluste bei der Mistanwendung lagen bisher kaum zuverlässige Angaben vor. In unserem Versuchsprogramm wurden deshalb sowohl in Feld- wie Windtunnelversuchen Messungen nach der Anwendung von Mist durchgeführt. Die Versuche zeigen, dass die Verluste bei Mist hauptsächlich durch die ausgebrachte Ammoniummenge bestimmt werden.

Überall wo tierische Exkremente mit der Luft in Kontakt kommen, entweicht Ammoniak. Diese Ammoniakverluste sind ein bedeutender Stickstoffverlust für die Landwirtschaft, erschweren wegen ihres sehr unterschiedlichen Ausmasses die Düngungsplanung und belasten die Umwelt. Das Ausmass der Verluste voraussagen und gezielt verringern zu können, liegt deshalb im Interesse der Landwirtschaft. Bisher war dies für Mist besonders schwierig, da noch kaum entsprechende Versuche durchgeführt wurden. In einem gemeinsamen Projekt verschiedener Forschungsanstalten und der ETH-Zürich versuchten wir diese Lücken zu schliessen. Hier die Ergebnisse der Versuche im Zusammenhang mit der Mistanwendung.

Durchgeführte Untersuchungen

Feldversuche: In Feldversuchen wurde Gülle oder Mist auf kreisförmigen Flächen mit einem Durchmesser von 40 m ausgebracht. Nach der Z_{INST} -Methode von Wilson *et al.* (1982) und Wilson und Shum (1992) massen wir im Zentrum dieser Flächen auf einer bestimmten Höhe über dem Boden kontinuierlich die Ammoniakkonzentration und die Windgeschwindigkeit (Katz 1996). Daraus konnten die Ammoniakverluste berechnet werden. In jedem Versuch verglichen wir drei Verfahren. Die Messungen dauerten zwei bis vier Tage. Danach waren die Emissionen meist so gering, dass sie kaum mehr bestimmt werden konnten.

Um die bei unterschiedlichen Witterungsbedingungen durchgeführten Versuche besser vergleichen zu können, gab es ein Standardverfahren mit ca. 30 m³/ha Rindvieh-Vollgülle aus dem gleichen Stall (ca.

1:1 verdünnt [Teile Wasser : Teile Gülle]), die breitflächig ausgebracht wurde (Prallteller). Insgesamt wurden vierzehn Mistverfahren untersucht; elf davon auf Grünland (Kunstpflanzfläche), zwei auf Weizenstoppeln und eines auf Maisstoppeln. Variiert wurde hauptsächlich die Art beziehungsweise die Zusammensetzung des Mistes. In sieben Verfahren wurde verrotteter Stapelmist von Milchviehbetrieben

eingesetzt. Die weiteren Verfahren umfassten frischen und besonders stark verrotteten Stapelmist, locker gelagerten Mist von einem Kettenentmistungssystem, Schweinemist (Offenfrontstall) und zwei verschiedene Geflügelmist. In einem Versuch untersuchten wir die Verluste bei drei Anwendungsmengen (15, 35 und 55 t/ha).

Windtunnelversuche: Die Bedeutung einzelner Variablen wie Herkunft und Menge des eingesetzten Mistes untersuchten wir mittels Windtunnels, vergleichbar mit jenen von Lockyer (1984; Abb. 1). Die Hofdünger wurden dabei auf einer Fläche von 1 m² ausgebracht. Danach deckten wir diese Fläche mit einer gewölbten Polycar-

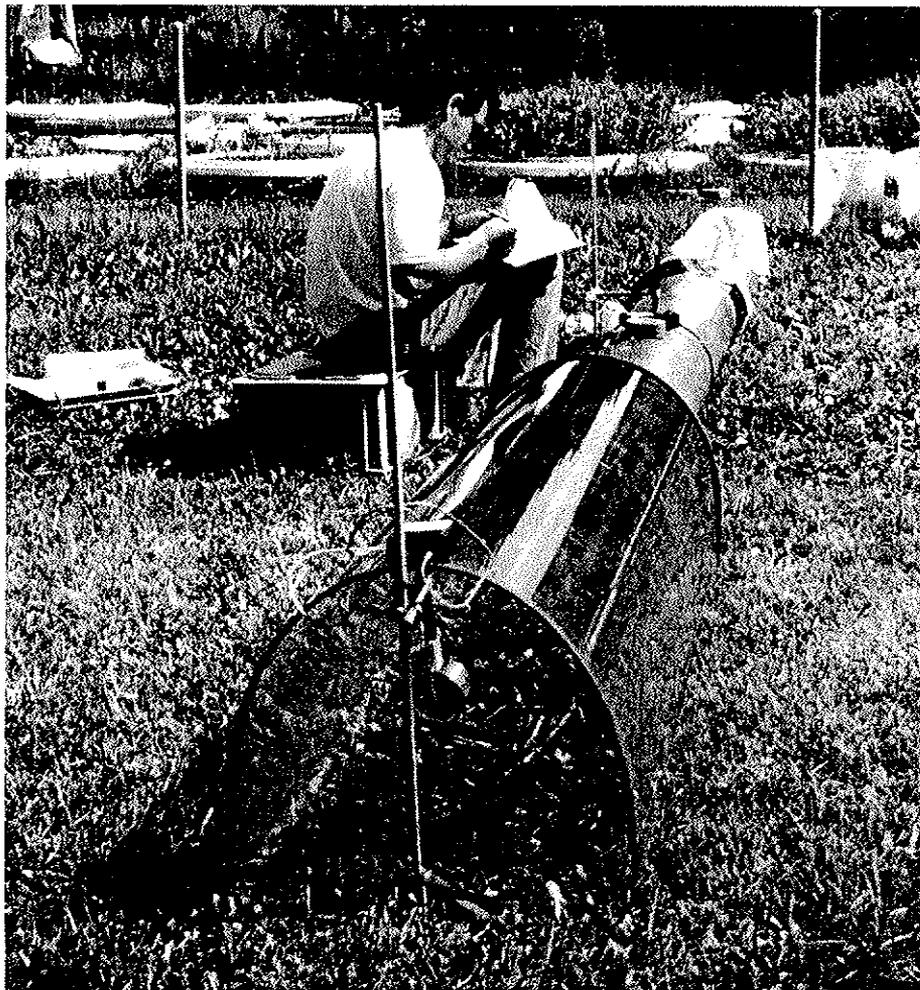


Abb. 1. Windtunnelanlage zur Messung der Ammoniakverluste nach der Hofdüngeranwendung.

bonatplatte ab und sogen mittels eines Ventilators Luft mit konstanter Geschwindigkeit darüber. Die Luftmenge und der Ammoniakgehalt dieser Luft wurde gemessen (Katz 1996; Keller 1995). Vorversuche zeigten, dass die Windgeschwindigkeit über der Mistfläche im Bereich von 1,1 bis 2,7 m/s die Verluste kaum beeinflusste (Keller 1995). Die weiteren Versuche wurden deshalb alle mit einer konstanten Windgeschwindigkeit von 1,9 m/s durchgeführt. Ein Vergleichsversuch mit sieben identischen Verfahren zeigte, dass die angewandte Methodik gut reproduzierbare Ergebnisse liefert (Verluste $4,34 \pm 0,28$ g N/m²; Standardabweichung). Insgesamt wurden sechs Windtunnelversuche mit Mist durchgeführt. In drei Versuchen wurde Rindviehmist unterschiedlicher Herkunft, das heisst mit unterschiedlichem Ammoniumgehalt verglichen (Anwendungsmenge 5 kg/m², pro Versuch drei Verfahren mit je zwei Wiederholungen), in zwei Versuchen variierten wir die Anwendungsmenge (1, 3, 5, 7, 9 und 11 kg Mist pro m²) und in einem Versuch wurden zwei Geflügelmist (gelagerter Hennenkot von Kotbandsystem, Geflügelmist aus Pouletmast) mit Rindvieh-Stapelmist verglichen. Die ersten fünf Versuche dauerten sechs Tage, der Versuch mit Geflügelmist 15 Tage. Pro Versuch standen sechs bis sieben Windtunnels zur Verfügung.

Ammoniakverluste in Feldversuchen

Der Verlauf der Ammoniakverluste war bei Mist grundsätzlich ähnlich wie bei Gülle (Abb. 2). Etwa 50 % der Verluste verzeichneten wir in den ersten vier Stunden nach dem Ausbringen. Bereits am

zweiten Tag waren die Verluste deutlich geringer.

Innerhalb der ersten zwei Tage nach dem Ausbringen (ca. 30 Stunden) gingen bei Mist durchschnittlich 59 % des ausgebrachten Ammonium/Ammoniakstickstoffs (TAN) beziehungsweise etwa 10 % des ausgebrachten Gesamtstickstoffs (N_{total}) verloren. Im Vergleich dazu betragen die Verluste bei Rindvieh-Vollgülle durchschnittlich 52 % des ausgebrachten TAN und bei kotarmer Gülle 60 %. In fast allen Versuchen waren die Verluste am dritten und vierten Tag nur noch gering. Die Verluste während der ersten zwei Tage können deshalb (ausser bei Geflügelmist) als gutes Mass für die Gesamtverluste angesehen werden.

Im Durchschnitt lagen die Verluste bei vergleichbarer Ausbringmenge mit Rindvieh- und Schweinemist um 15 % höher als jene des jeweiligen Gülle-Standardverfahrens. Bezogen auf die ausgebrachte TAN-Menge lagen die durchschnittlichen Verluste bei Mist etwa 30 % höher als bei den Gülle-Standardverfahren.

Für den weiteren Vergleich der Ammoniakverluste von Gülle und Mist wurde das empirische Modell von Katz (1996) herangezogen. Es basiert auf den Ergebnissen der Gülle-Standardverfahren und schätzt die Ammoniakverluste in Abhängigkeit vom Ammoniumgehalt der Gülle (TAN, kg N/t), vom Sättigungsdefizit der Luft während der ersten zwei Tage nach der Gülleanwendung (SD, mbar) und von der ausgebrachten Güllemenge (M; t/ha bzw. m³/ha):

$$\text{Verluste (kg N/ha)} = (19,408 \text{ TAN} + 1,102 \text{ SD} - 9,506) * (0,021 \text{ M} + 0,358) \quad (1)$$

Das Sättigungsdefizit der Luft ist abhängig von der Temperatur (T, °C) und der

relativen Luftfeuchtigkeit (rLF, ohne Einheit):

$$\text{SD} = (1 - \text{rLF}) * 6,112 * e^{(0,67 * T / (243,5 + T))} \quad (2)$$

Dieses Modell ist gültig für folgende Bedingungen: Rindvieh-Vollgülle breitflächig ausgebracht auf Grünland; TAN 0,7 bis 5 kg N/t; Durchschnittstemperaturen 0 bis 25 °C; relative Luftfeuchtigkeit 0,5 bis 0,9 (ohne Einheit); keine Niederschläge.

Die Verluste in den meisten Mistverfahren wurden mit dem Güllemodell leicht unterschätzt. Für die fünf Verfahren mit verrottetem Stapelmist war die Übereinstimmung zwischen gemessenen und geschätzten Werten allerdings gut (Abb. 3). Die Verfahren mit frischem Mist, Mist von Kettenentmischung und Schweinemist hatten deutlich höhere Verluste als geschätzt, das Verfahren mit stark verrottetem Mist geringere. Für die Verfahren auf Weizen- und Maisstoppeln lassen sich angesichts der grossen Streuung und der kleinen Zahl von Beobachtungen keine direkten Schlüsse ziehen. Die im Vergleich zu den Gülle-Standardverfahren wesentlich grössere Streuung der Mistverfahren kann mit den grossen Unterschieden bei der Zusammensetzung des Mistes erklärt werden, welche auf die unterschiedlichen Stallsysteme, Entmistungsgewohnheiten, Einstreumengen und -gehalte, die unterschiedliche Lagerdauer zurückgeführt werden kann.

Regressionsanalysen zwischen Ammoniakverlusten und Witterungsgrössen zeigten, dass für Mist wie für Gülle das Sättigungsdefizit der Luft den grössten Einfluss auf die Verluste hatte. Die Korrelation zwischen Verlusten und Witterungsgrössen war allerdings für Mist deutlich geringer als für Gülle.

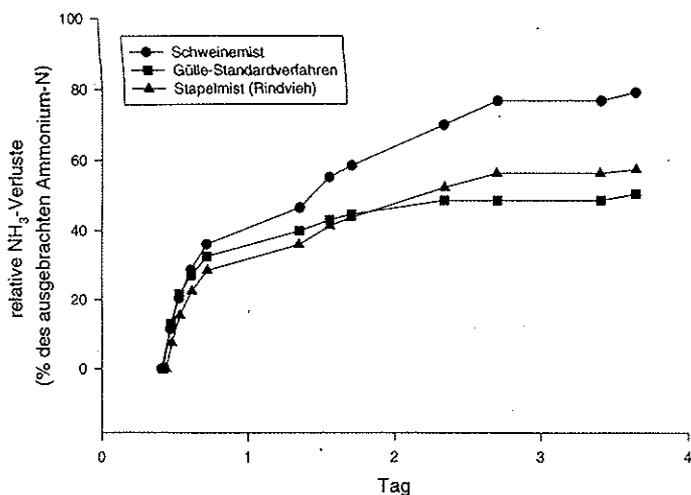


Abb. 2. Kumulierte Ammoniakverluste in % des ausgebrachten Ammoniumstickstoffes in einem Versuch im November 1993.

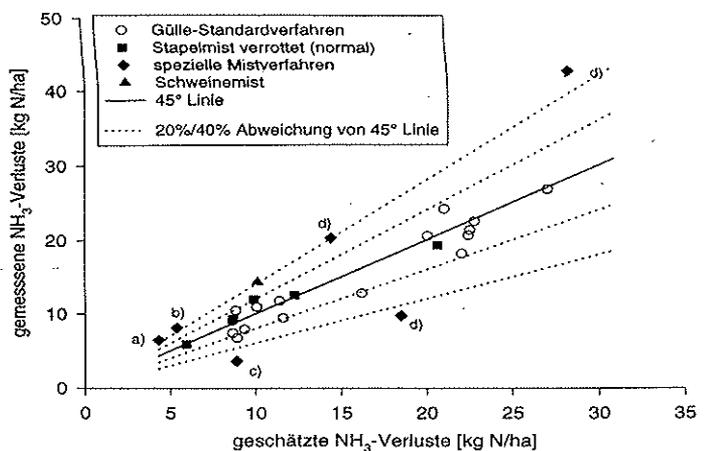


Abb. 3. Vergleich der gemessenen Ammoniakverluste mit den anhand des Güllemodells von Katz (1996) geschätzten Verlusten. Spezielle Mistverfahren: a) frischer Mist, b) lockerer Mist von Kettenentmischung, c) stark verrotteter Mist, d) auf Stoppeln.

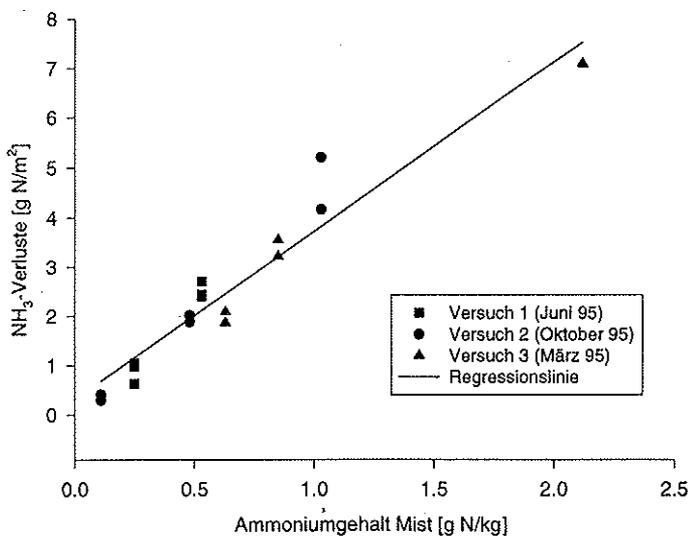


Abb. 4. Ammoniakverluste (g N/m²) nach dem Ausbringen von Mist (2,5 kg/m²) mit unterschiedlichem Ammoniumgehalt (TAN; g N/kg) in drei Windtunnelversuchen. Regression: Verluste = 3,72 TAN + 0,15; r² = 0,95.

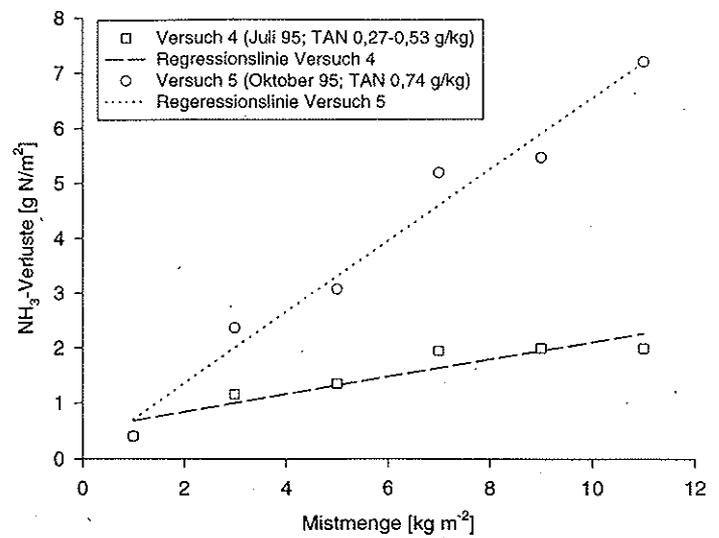


Abb. 5. Ammoniakverluste (g N/m²) nach dem Ausbringen von unterschiedlichen Mistmengen (M; kg/m²). Regressionsgleichungen: Versuch 4: Verluste = 0,159 TAN + 0,519, r² = 0,97; Versuch 5: Verluste = 0,650 TAN + 0,048, r² = 0,95.

Windtunnelversuche

Trotz recht unterschiedlicher Witterungsbedingungen stimmten die Ergebnisse der drei Versuche mit insgesamt acht unterschiedlichen Misttypen (Abb. 4) so gut überein, dass sie mit folgender linearer Regressionsgleichung beschrieben werden können:

$$\text{Verluste (g N/m}^2\text{)} = 3,72 \text{ TAN} + 0,15 \quad (r^2 = 0,95) \quad (3)$$

Die Ergebnisse der zwei Versuche mit unterschiedlichen Mistmengen konnten ebenfalls durch lineare Regressionsgleichungen beschrieben werden (Abb. 5). Wegen der unterschiedlichen Gehalte der Miste in den zwei Versuchen unterscheiden sich allerdings die zwei Regressionen. Werden die Verluste in allen fünf Versuchen in Abhängigkeit der ausgebrachten Ammoniummenge (M_{TAN}; g N/m²) aufge-

tragen, können sie durch eine einheitliche lineare Regression dargestellt werden (Abb. 6):

$$\text{Verluste (g N/m}^2\text{)} = 0,787 M_{\text{TAN}} + 0,076 \quad (r^2 = 0,95) \quad (4)$$

Dies ist ein Hinweis, dass die Ammoniakverluste nach der Anwendung von Rindvieh- und Schweinemist in erster Linie von der ausgebrachten Ammoniummenge und kaum von den Witterungsbedingungen abhängig sind. Dies belegt auch die relativ gute Übereinstimmung der Verluste in Feldversuchen mit Gleichung (4) (Abb. 7). Allerdings ist bekannt, dass Windtunnelversuche wegen der höheren und konstanten Windgeschwindigkeit die Verluste leicht überschätzen. Die mittleren Verluste betragen in Feldversuchen 60 % und in Windtunnelversuchen 80 % der eingesetzten Ammoniummenge. Um

dem Rechnung zu tragen, müssten die Ergebnisse der Tunnelversuche zur Übertragung auf Praxisbedingungen mit 0,75 multipliziert werden. Entsprechend könnten die Verluste nach der Anwendung von Rindvieh- oder Schweinemist mit folgender Gleichung zuverlässig abgeschätzt werden:

$$\text{Verluste (kg N/ha)} = 0,75 * [0,787 * M \text{ (t/ha bzw. m}^3\text{/ha)} * \text{TAN (kg N/m}^3\text{)} + 0,76] \quad (5a)$$

oder ausmultipliziert

$$\text{Verluste (kg N/ha)} = 0,59 * M \text{ (t/ha bzw. m}^3\text{/ha)} * \text{TAN (kg N/m}^3\text{)} + 0,57 \quad (5b)$$

Diese Gleichungen gelten besonders für durchschnittlich verrotteten Stapelmist und Laufstallmist. Für frischen Mist dürften sie die Verluste eher unter-, für besonders stark verrotteten Mist (Lagerdauer ein Jahr und länger) eher überschätzen.

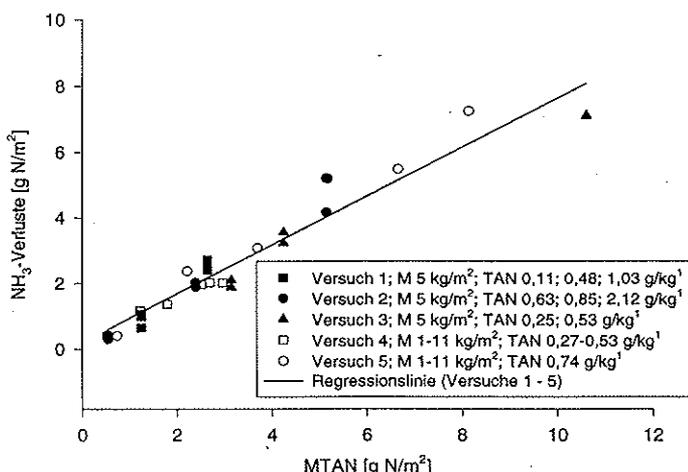


Abb. 6. Ammoniakverluste (g N/m²) in allen fünf Windtunnelversuchen in Abhängigkeit der ausgebrachten Ammoniummenge (MTAN; g N/m²). Regression: Verluste = 0,787 MTAN + 0,076; r² = 0,95.

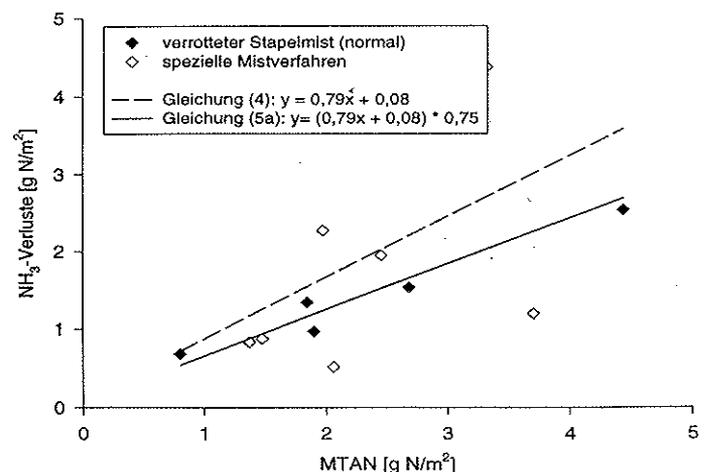


Abb. 7. Ammoniakverluste (g N/m²) in Feldversuchen in Abhängigkeit der ausgebrachten Ammoniummenge (MTAN; g N/m²). Vergleich der gemessenen Werte mit den Schätzungen anhand von Gleichung 5a.

Ammoniakverluste bei Geflügelmist

In den Feldversuchen betragen die Verluste während vier Tagen nach der Anwendung für Legehennenkot (Trockensubstanzgehalt (TS) 34 %, N_{total} -Gehalt 22 kg N/t, Menge 22 t/ha) 19 % des ausgebrachten N_{total} und für Geflügelmist aus der Pouletmast (TS 62 %, N_{total} 32 kg N/t, Menge 17 t/ha) 3 % des ausgebrachten N_{total} . Es muss angenommen werden, dass die Verluste nach Abschluss der Messungen noch für längere Zeit andauern. In den Windtunnelversuchen nahmen die Verluste vom vierten bis zum fünfzehnten Tag noch um rund 50 % zu und schienen auch nach dieser Zeit weiterzugehen. Die Verluste während fünfzehn Tagen betragen in diesen Windtunnelversuchen etwa 10 % für Hennenkot (TS 33 %, N_{total} 19 kg N/t, Menge 2,5 kg/m²) und 8 % für Geflügelmist aus der Pouletmast (TS 72 %, N_{total} 32 kg N/t, Menge 2,5 kg/m²).

Folgerungen und Empfehlungen

Die Ammoniakverluste nach der Mistanwendung sind bezogen auf die ausgebrachte Ammoniummenge etwa 20 % höher als bei Gülle. Als mittlere Verluste können in überschlagsmässigen Berechnungen für Mist und kotarme Gülle 60 % und für Vollgülle 50 % des ausgebrachten Ammoniumstickstoffes eingesetzt werden.

Während die Verluste nach der Anwendung von Gülle stark von den Witterungsbedingungen beeinflusst wurden, waren die Verluste nach der Anwendung von Mist fast nur von der ausgebrachten Ammoniummenge abhängig. Entsprechend sind für Mist im Gegensatz zu Gülle relativ geringe saisonale Unterschiede bei den Ammoniakverlusten zu erwarten. Für Praxisverhältnisse liefert Gleichung (5b) eine einfache und recht zuverlässige Abschätzung der Verluste.

Die einzige wirkungsvolle Massnahme zur Reduktion der Ammoniakverluste nach der Mistanwendung ist das rasche Einarbeiten. Da der Hauptteil der Verluste in den ersten Stunden nach dem Ausbringen eintritt, muss dies sofort, das heisst möglichst innerhalb von zwei Stunden geschehen. Dies setzt voraus, dass Ausbringen und Einarbeiten gleichzeitig durchgeführt werden können. Futterbaubetriebe mit Mistproduktion müssen zur Minderung der Ammo-

niakverluste hauptsächlich die Gülleanwendung optimieren (Frick *et al.* 1996; Frick und Menzi 1997).

Wegen des wesentlich geringeren Ammoniumanteils im Mist als in der Gülle sind die Verluste ausgedrückt als Anteil am Gesamtstickstoff bei Mist deutlich geringer. Neben Stapelmist wird aber kotarme Gülle mit hohem Ammoniumgehalt produziert, welche ein hohes Verlustpotential aufweist. Die Ammoniakverluste nach dem Ausbringen der von einer Kuh produzierten Vollgüllemenge sind daher rund 10 % geringer als die Verluste nach dem Ausbringen der von einer Kuh produzierten Menge an Stapelmist und kotarmer Gülle.

LITERATUR

Frick R. und Menzi H., 1997. Hofdüngeranwendung: Wie Ammoniakverluste vermindern? FAT-Bericht Nr. 496, Eidg. Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik, Tänikon, 12 S.

Frick R., Menzi H. und Katz P.E., 1996. Ammoniakverluste nach der Hofdüngeranwendung. FAT-Bericht Nr. 486, Eidg. Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik, Tänikon, 12 S.

Katz P.E., 1996. Ammoniakemissionen nach der Gülleanwendung auf Grünland. Diss. ETH-Zürich Nr. 11382, 71 S.

Keller M., 1995. Messtechnische Abklärungen zur Bestimmung der Ammoniakverluste nach dem Ausbringen von Mist. Diplomarbeit ETH-Zürich, 65 Seiten (unveröffentlicht).

Lockyer D.R., 1984. A system for the measurement in the field of losses of ammonia through volatilization. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 35, 837-848.

Wilson J.D. and Shum W.K.N., 1992. A re-examination of the integrated horizontal flux method for estimating volatilisation from circular plots. *Agricultural and Forest Meteorology* 57, 281-295.

Wilson J.D., Thurtell G.W., Kidd G.E. and Beauchamp E.G., 1982. Estimation of the rate of gaseous mass transfer from a surface source plot to the atmosphere. *Atmospheric Environment* 16, 1861-1867.

RÉSUMÉ

Pertes d'ammoniac après l'application du fumier

Les pertes d'ammoniac après l'épandage du fumier ont été mesurées dans des essais en champs et sous tunnels. En moyenne elles se sont élevées à 60 % de la quantité d'azote ammoniacal épandu. A partir des essais sous tunnels en différentes saisons et avec des fumiers à différentes compositions, on a constaté une relation hautement significative entre la quantité d'am-

monium épandu (M_{TAN}) et les pertes d'ammoniac. Il en résulte que ces pertes n'ont pratiquement pas été influencées par les conditions météorologiques et par l'origine du fumier. Dans les conditions de la pratique les pertes d'ammoniac peuvent être estimées de façon relativement sûre par l'équation suivante: pertes (kg N/ha) = $0,59 M_{\text{TAN}} + 0,57$. Les essais indiquent que les pertes d'ammoniac à l'épandage sont plus faibles pour les systèmes de lisier que pour les systèmes produisant du purin et du fumier.

SUMMARY

Ammonia emissions following the application of solid manure

Ammonia emissions following the application of solid manures were measured in field and wind tunnel experiments. Mean emissions were about 60 per cent of total ammoniacal nitrogen (TAN) applied. Wind tunnel experiments with solid manures undertaken in different seasons showed a linear and highly significant relationship between the rate of ammoniacal nitrogen applied (M_{TAN}) and emissions. This indicates that emissions were hardly influenced by climatic factors and the origin of the manure. On farms ammonia emissions following spreading of solid manure can be estimated by the following equation: Emission (kg N/ha) = $0,59 M_{\text{TAN}} + 0,57$. The experiments indicate that ammonia losses after manure application tend to be lower for liquid manure systems than for systems in which slurry and solid manure are produced.

KEY WORDS: ammonia emissions, solid manure, application, field measurements, wind tunnels