

# Umwelt

## Zeltdachlüftung vermindert Emissionswirkung bei Güllebehältern

Ludo Van Caenegem, Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, CH-8356 Ettenhausen  
Auskünfte: Ludo Van Caenegem, E-Mail: ludo.vancaenegem@art.admin.ch, Tel. +41 52 368 31 31

### Zusammenfassung

**A**mmoniakemissionen bedeuten für die Landwirtschaft einen Verlust an Stickstoffdüngern. Sie belasten ausserdem die Umwelt. Ein Teil der Verluste findet während der Lagerung von Gülle statt. Um diese zu verringern, wird bei neuen Güllebehältern eine künstliche Abdeckung gefordert. Als künstliche Abdeckungen haben sich vor allem Zeltdächer und Schwimmfolien durchgesetzt. Je dichter die Abdeckung, desto wirksamer reduziert sie Emissionen. Andererseits darf sich unter der Abdeckung kein explosives Gas-Luft-Gemisch bilden. Das ist der Fall, wenn die Methankonzentration zwischen 4,4 und 16,5 Volumenprozent (Vol.-%) liegt. Ein minimaler Luftwechsel muss deshalb verhindern, dass diese Konzentration erreicht wird.

Wie gross die minimale Lüftungsrate sein muss, hängt von der maximalen Methan-Emissionsrate ab. Diese wird von mehreren Faktoren wie Güllebeschaffenheit, Gülletemperatur, Temperatur unter dem Zeltdach und Stärke allfälliger natürlicher Schwimmschichten beeinflusst. Wie sich diese Faktoren unter Praxisbedingungen auf die Gasfreisetzung auswirken, war bisher unbekannt.

Aus diesem Grunde wurden an der ART Emissionsmessungen an einem Güllesilo mit Zeltdach bei verschiedenen Aussenbedingungen und Lüftungsraten durchgeführt. Gemessen wurde sowohl die Methankonzentration als auch die Ammoniak- und Kohlenstoffdioxidkonzentration im Abluftstrom. Aus den Messergebnissen liess sich die minimale Lüftungsrate ableiten. Hieraus kann der erforderliche Querschnitt der Lüftungsöffnungen für beliebige Güllebehälter mit Zeltdach im Hinblick auf einen sicheren Betrieb errechnet werden.

Über einem bestehenden runden Silo des Versuchsbetriebes ART in Tänikon wurde ein Zeltdach mit Pendelstütze montiert

(Abb. 1). Die Plane ist biaxial gespannt und ringsherum an der Betonwand verklebt. Der Innendurchmesser beträgt 11,28 m, die

Zeltdachhöhe 3,9 m. Der Silo hat eine Nutzhöhe von 4 m und ein Nutzvolumen von 400 m<sup>3</sup>. Die Zuluftrate ist über vier radial verteilte Öffnungen regelbar (4 x 0,4 m<sup>2</sup>). Die Luft wird durch eine Öffnung in der Kegelspitze mit Durchmesser 0,16 m von einem Radiallüfter (0,55 kW, 650 m<sup>3</sup>/h bei 1000 Pa) abgesaugt. Der Lüfter ist mit Hilfe eines Frequenzumrichters stufenlos (0–650 m<sup>3</sup>/h) regelbar. Die Erfassung der Gaskonzentrationen erfolgte in fünf Minutenintervallen mit Hilfe eines Handmessgeräts (Polytector II, Firma GfG). Das Gerät verfügt über eine eingebaute Gasförderpumpe und einen Datenlogger. Es kann gleichzeitig bis zu sechs Gase messen. Während des Versuchs waren Sensoren für Methan, Ammoniak und Kohlenstoffdioxid eingebaut. Die Methangaskonzentration wird nach dem Messprinzip der Wärmetönung ermittelt und in Prozent der unteren Explosionsgrenze (%-UEG) angezeigt. Der Messbereich beträgt 0–100 %-UEG (100 % entspricht 4,4 Vol.-% oder 44 000 ppm), die Auflösung: 0,5 %-UEG (200 ppm). Die Ammoniakkonzentration wird in einer elektrochemischen Messzelle (Messbereich 0–200 ppm, Auflösung 0,5 ppm) und die Kohlenstoffdioxidkonzentration mit einer Infrarot-Messzelle (Messbereich 0–10 000 ppm, Auflösung 50 ppm) gemessen. Die Sensoren wurden über ein Abgleichprogramm an der Frischluft und mit Hilfe eines Kalibriergases periodisch justiert. Die Luftgeschwindigkeit wurde kontinuier-



Abb. 1. Versuchsanlage an der ART zur Messung der CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub> und CO<sub>2</sub>-Emissionen während der Güllelagerung.

lich in der Mitte des Abluftrohrs mit Hilfe eines Hitzdrahtanemometers (Schmidt-Feintechnik, D-78112 St. Georgen; 0-20 m/s) gemessen und aufgezeichnet. Die mittlere Luftgeschwindigkeit errechnet sich im Bereich der turbulenten Strömung aufgrund des Blasius'schen Gesetzes ( $Re < 10^5$ ) durch Multiplikation der Luftgeschwindigkeit in der Rohrmitte mit dem Faktor 0,817. Die Temperatur unter dem Zeltdach und in der Gülle wurde mit Hilfe von pt-100-Sensoren aufgezeichnet.

### Emissionsrate, Konzentration, Lüftungsrate

Zwischen der Gaskonzentration ( $c$ ) unter dem Zeltdach, der Gasfreisetzung ( $m_g$ ), Lüftungsrate ( $m_L$ ) und Luftvolumen unter dem Zeltdach ( $V$ ) besteht folgende Beziehung (I).

Für konstante Werte von  $m_g$  und  $m_L$ , lässt sich durch Integration der Gleichung (I) die Gaskonzentration unter dem Zeltdach in Abhängigkeit der Zeit berechnen (II).

Mit Hilfe von Gleichung (II) kann theoretisch für beliebige Lüftungsraten, Emissionsraten und Leervolumen unter dem Zeltdach der Verlauf der Gaskonzentration vorausgesagt werden. Da jedoch bei den unter Praxisbedingungen durchgeführten Messungen die Emissionsraten wegen der wechselnden Witterung nicht konstant waren, lässt sich die Gleichung (II) für die Modellierung der Messergebnisse nicht anwenden und es wurde ein numerisches Verfahren gewählt. Dieses besteht darin, dass man für jede endlich kleine Messperiode ( $\Delta t$ ) aus der Konzentrationsänderung des Gases ( $\Delta c_{i+1-i}$ ) im Abluftstrom die momentane Gasfreisetzung ( $m_{g,i}$ ) berechnet (III) und anschliessend durch Summierung der Gasbilanzen (Gasfreisetzung – Gasabfuhr durch die Lüftung) die Konzen-

tration (IV) unter dem Zeltdach ermittelt.

Die Gasfreisetzung pro Flächeneinheit in  $g/m^2 \cdot h$  errechnet sich durch Multiplikation der Gaskonzentration im Abluftstrom (ppm) mit der Lüftungsrate pro Flächeneinheit ( $m^3/h \cdot m^2$ ) und der Gasdichte ( $NH_3$ :  $759 g/m^3$ ,  $CO_2$ :  $1963 g/m^3$ ,  $CH_4$ :  $716 g/m^3$ ).

### Erforderliche Zu- und Abluftöffnungen

Bei natürlicher Lüftung hängt die Lüftungsrate einerseits von der Temperaturdifferenz zwischen der Aussenluft und dem Luft-Gas-Gemisch unter dem Zeltdach und andererseits von der Windgeschwindigkeit ab. Ist der Querschnitt der Zu- und Abluftöffnungen identisch, lässt sich dieser mit Hilfe von Formel (V) berechnen (Van Caenegem *et al.* 2000).

Bei der Bestimmung der minimalen Zu- und Abluftöffnungen soll man von den ungünstigsten klimatischen Bedingungen ausgehen: geringe Temperaturdifferenz innen-aussen und Windstille. In Tännikon liegt beispielsweise in der warmen Jahreszeit (Mai-September) das Stundenmittel der Windgeschwindigkeit während etwa 250 Stunden unter 0,2 m/s (1996: 208 Stunden, 1997: 257 Stunden). Vernachlässigt man folglich die Windgeschwindigkeit, drückt den Höhenunterschied als Funktion der Dachneigung ( $\alpha$ ) und des Behälterdurchmessers ( $D$ ) aus und nimmt als Widerstandszahl der Öffnungen  $k_1=0,7$ ,  $k_2=0,2$  an, wird die Gleichung (V) bei gleichem Querschnitt der Zu- und Abluftöffnungen.

### Versuchsergebnisse

Die Emissionsmessungen wurden 2005 und 2007 mit Rindergülle und 2006 mit Schweinegülle für verschiedene Aussenklimabedingungen an einzelnen Tagen in der Periode Mai bis November durchgeführt. Die betriebs-eigene Rindergülle hatte 2,75 kg

$$dc = \frac{m_g - m_L(c - c_a)10^{-6}}{V} 10^6 dt \text{ ppm (I)}$$

$m_g$ : Gasfreisetzung aus der Gülle ( $m^3/h$ )  
 $m_L$ : Lüftungsrate ( $m^3/h$ )  
 $c$ : Gaskonzentration unter dem Zeltdach zum Zeitpunkt «t» (ppm)  
 $c_a$ : Gaskonzentration in der Aussenluft (ppm)  
 $V$ : Luftvolumen unter der Abdeckung ( $m^3$ )  
 $t$ : Zeit (h)

$$c = \left[ \frac{m_g}{m_L} + c_a 10^{-6} - \frac{m_g - m_L(c_0 - c_a)10^{-6}}{m_L} e^{-\frac{m_L t}{V}} \right] 10^6 \text{ ppm (II)}$$

$c_0$ : Gaskonzentration unter dem Zeltdach zum Zeitpunkt  $t=0$  (ppm)

$$m_{g,i} = \frac{\Delta c_{i+1-i} \cdot V}{10^6 \cdot \Delta t} + m_{L,i}(c_i - c_a) \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{h (III)}$$

$$c = \sum_{i=1}^{i=t/\Delta t} \frac{m_{g,i} - m_{L,i}(c_i - c_a) \cdot 10^{-6}}{V} 10^6 \Delta t + c_0 \text{ ppm (IV)}$$

$$A_{zu} = A_{ab} = \frac{m_L}{3600} \cdot \sqrt{\frac{1 + k_1 + k_2}{2 \cdot g \cdot \Delta H \cdot \frac{\Delta T}{T_i} + (w_{zu}^2 - w_{ab}^2)}} \text{ m}^2 \text{ (V)}$$

$m_L$ : Lüftungsrate ( $m^3/h$ )  
 $w_{zu}$ : Windgeschwindigkeit einwirkend auf der Zuluftseite (m/s)  
 $w_{ab}$ : Windgeschwindigkeit einwirkend auf der Abluftseite (m/s)  
 $g$ : Erdbeschleunigung =  $9,8 m/s^2$   
 $\Delta H$ : Höhenunterschied zwischen Mitte-Zu- und Mitte-Abluftöffnung (m)  
 $\Delta T$ : Temperaturunterschied innen/aussen (K)  
 $T_i$ : Temperatur unter dem Zeltdach (K)  
 $k_1$ : Widerstandszahl der Zuluftöffnungen  
 $(1 + k_2)$ : Widerstandszahl der Abluftöffnungen.  
 Die Zahl 1 berücksichtigt die dynamischen Druckverluste  
 $A_{zu}$ : Querschnitt der Zuluftöffnungen ( $m^2$ )  
 $A_{ab}$ : Querschnitt der Abluftöffnungen ( $m^2$ )

$$A_{zu} = A_{ab} = \frac{m_L}{3600} \sqrt{\frac{1,9}{2 \cdot g \cdot \frac{D}{2} \cdot \tan(\alpha) \cdot \frac{\Delta T}{T_i}}} \text{ m}^2 \text{ (VI)}$$

Gesamtstickstoff pro  $m^3$ , die Schweinegülle  $3,95 kg/m^3$ . Der Messintervall betrug fünf Minuten. Die Gülletemperatur variierte während der Messperioden zwischen  $13 \text{ }^\circ\text{C}$  (Mai) und  $22 \text{ }^\circ\text{C}$  (Juli). Die maximale gemessene Temperatur unter dem Zeltdach betrug  $61,3 \text{ }^\circ\text{C}$ . Der Füllstand der Gülle war bei allen Versuchen  $3,5 m$  ( $350 m^3$ ), das Leervolumen unter dem Zelt-

dach etwa 157 m<sup>3</sup>. Das Verhältnis Gülleoberfläche zum Güllevolumen betrug 1:3,5.

Die absoluten Emissionen mg/m<sup>2</sup>h schwankten stark in Abhängigkeit der Gülletemperatur, der Temperatur des Gas-Luftgemischs unter dem Zeltdach und der Lüftungsrate (Tab.1, 2, 3). Die emittierten Mengen an CH<sub>4</sub> und CO<sub>2</sub> unterschieden sich nicht wesentlich für Rinder- und Schweinegülle. Die Ammoniakemissionen waren bei Schweinegülle jedoch bedeutend höher als bei Rindergülle.

Zwischen der Emissionsmenge und den einzelnen Einflussfak-

toren stellten sich folgende Zusammenhänge heraus:

#### Gülletemperatur

Bei einer Gülletemperatur unter 15 °C ist die freigesetzte Methanmenge gering (<2 g/m<sup>2</sup> h). Die höchsten gemessenen Methanemissionen bei Gülle in Ruhezustand und einer Gülletemperatur von etwa 20 °C betragen 15,5 g/m<sup>2</sup> h für Rindergülle und 21 g/m<sup>2</sup> h für Schweinegülle. Bei den NH<sub>3</sub>- und CO<sub>2</sub>-Emissionen unterschieden sich die Emissionen bei einer Gülletemperatur von 20 °C nicht wesentlich von denjenigen bei 15 °C.

#### Temperatur des Luft-Gasgemisches

Mit steigender Temperatur des Luft-Gasgemischs unter dem Zeltdach nahm die NH<sub>3</sub>-Konzentration im Abluftstrom stark zu (Abb. 2). Die CH<sub>4</sub>-Emissionen waren ebenfalls positiv zur Temperatur unter dem Zeltdach korreliert. Der Einfluss der Gas-temperatur war jedoch weniger ausgeprägt als jener der Gülletemperatur. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen nahmen mit steigender Temperatur unter dem Zeltdach nur geringfügig zu.

#### Einfluss der Lüftungsrate

Bei Ammoniak konnte ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Lüftungsrate und den Emissionen festgestellt werden. Die Emissionen nahmen proportional zur Lüftungsrate zu. Erst nach mehreren Stunden bei hoher Lüftungsrate (640 m<sup>3</sup>/h) sanken sie ab (Abb. 3). Der Luftwechsel beeinflusste die Methanfreisetzung aus der Gülle nur unwesentlich, die Konzentration unter dem Zeltdach jedoch stark. Am 27.06.05 wurde um 9.50 Uhr der Lüfter abgestellt. Die Zuluftöffnungen wurden von 4000 cm<sup>2</sup> bis auf etwa 200 cm<sup>2</sup> auf einer Seite geschlossen. Durch das Abluftrohr floss während dieser Zeit etwa 10 m<sup>3</sup>/h. Als drei Stunden später (12.50 Uhr) der Lüfter erneut gestartet wurde, betrug die CH<sub>4</sub>-Konzentration im Abluftstrom 56 000 ppm. Dies entspricht 127 % der unteren Explosionsgrenze. Eine konstante Lüftungsrate von 280 m<sup>3</sup>/h während eineinhalb Stunden war nötig, um die Methan-Konzentration auf etwa 20 %-UEG abzusinken. Die Gülletemperatur betrug zu diesem Zeitpunkt 20,6 °C. In den nächsten 22 Stunden schwankte die Methanfreisetzung zwischen 12 und 20 %-UEG. Ähnlich wie bei Methan zeigt der Verlauf der CO<sub>2</sub>-Emissionen, dass die Lüftungsrate nur einen geringen Einfluss auf die Freisetzung hat.

**Tab. 1. Bandbreite der gemessenen NH<sub>3</sub>-, CH<sub>4</sub>- und CO<sub>2</sub>-Emissionen bei Rindergülle (2005) für drei verschiedene Messperioden**

Messperiode	29.11.05 10:28 bis 01.12.05 12:37	14.06.05 17:10 bis 15.06.05 0:15	08.07.05 8:17 bis 11.07.05 9:37
Gülletemperatur °C	3,4 °C	14,7 °C	20,0 °C
Lüftungsrate m <sup>3</sup> /h	94	94	95
NH <sub>3</sub> -Emissionen mg/m <sup>2</sup> h	0 - 4	15 - 26	0 - 11
CH <sub>4</sub> -Emissionen mg/m <sup>2</sup> h	0 - 0	1331 - 1774	3602 - 10356
CO <sub>2</sub> -Emissionen mg/m <sup>2</sup> h	534 - 663	3298 - 9876	4470 - 18030

**Tab. 2. Bandbreite der gemessenen NH<sub>3</sub>-, CH<sub>4</sub>- und CO<sub>2</sub>-Emissionen bei Schweinegülle (2006) für zwei verschiedene Messperioden**

Messperiode	20.06.06 14:30 - 20.06.06 16:35	05.07.06 16:21 - 06.07.06 17:01
Gülletemperatur °C	15,1	19,5
Lüftungsrate m <sup>3</sup> /h	278	346
NH <sub>3</sub> -Emissionen mg/m <sup>2</sup> h	216 - 275	56 - 263
CH <sub>4</sub> -Emissionen mg/m <sup>2</sup> h	0 - 0	4430 - 12025
CO <sub>2</sub> -Emissionen mg/m <sup>2</sup> h	10340 - 19742	11004 - 25816

**Tab. 3. Bandbreite der gemessenen NH<sub>3</sub>-, CH<sub>4</sub>- und CO<sub>2</sub>-Emissionen bei Rindergülle (2007) für zwei verschiedene Messperioden**

Messperiode	12.06.07 9h45 - 12.08.07 13h40	16.08.07 9h18 - 17.08.07 10h43
Gülletemperatur °C	15,5	19,5
Lüftungsrate m <sup>3</sup> /h	339	342
NH <sub>3</sub> -Emissionen mg/m <sup>2</sup> h	0 - 37	0 - 19
CH <sub>4</sub> -Emissionen mg/m <sup>2</sup> h	931 - 2358	3574 - 7420
CO <sub>2</sub> -Emissionen mg/m <sup>2</sup> h	11828 - 16090	5791 - 11290

## Einfluss der natürlichen Schwimmschicht

Um den Einfluss der natürlichen Schwimmschicht, die während des Versuchs etwa 10 cm betrug, zu beurteilen, wurden die Emissionen vor und nach dem Rühren gemessen. Dass die Schwimmschicht nicht sehr ausgeprägt war, war darauf zurückzuführen, dass die Gülle vor der Umlagerung von der Güllegrube in den Güllesilo homogenisiert wurde. Am 15. September 2005 wurde um 13.43 Uhr das Rührwerk eingeschaltet. Die Lüftungsrate betrug vor und nach dem Rühren etwa  $85 \text{ m}^3/\text{h}$ , die Gülletemperatur  $20,2 \text{ }^\circ\text{C}$ , die Temperatur unter dem Zeltdach lag zwischen  $35$  und  $41 \text{ }^\circ\text{C}$ . Die Ammoniakemissionen stiegen nach etwa zwei Stunden von  $0,003 \text{ g/m}^2 \text{ h}$  auf etwa  $0,037 \text{ g/m}^2 \text{ h}$  und blieben auch die nächsten 24 h auf einem 10-fach höheren Niveau im Vergleich zur Situation vor dem Rühren. Kurz nach der Zerstörung der Schwimmschicht stiegen die  $\text{CH}_4$ -Emissionen von etwa  $1,7$  auf  $4,1 \text{ g/m}^2 \text{ h}$ . Einen ähnlichen Verlauf zeigten die  $\text{CO}_2$ -Emissionen. Sie nahmen von  $5$  auf  $20 \text{ g/m}^2 \text{ h}$  zu. Beim zweiten Versuch mit Rindergülle (2007) wurde die Gülle bereits einen Monat früher gerührt (22.08.07 von 11 bis 12 Uhr). Vor dem Rühren (9 bis 11 Uhr) betragen die Methan-Emissionen bei einer Lüftungsrate von  $350 \text{ m}^3/\text{h}$   $7$  bis  $8 \text{ g}$  pro  $\text{m}^2$  und Stunde. Direkt nach dem Rühren erhöhte sich die Methanfreisetzung schlagartig (Abb. 4). Sie erreichte etwa 45 Minuten nach Rühranfang einen Spitzenwert von  $64 \text{ g/m}^2 \text{ h}$  und eine Konzentration von  $32 \%$  der UEG. Um zu vermeiden, dass der Messbereich überschritten würde, wurde die Lüftungsrate auf  $640 \text{ m}^3/\text{h}$  erhöht. Die Emissionen fielen nach Erhöhung der Lüftungsrate innerhalb einer Stunde unter  $20 \text{ g/m}^2 \text{ h}$ . Sie waren jedoch die nächsten Tage deutlich höher ( $15$ – $16 \text{ g/m}^2 \text{ h}$  bei Temperaturen

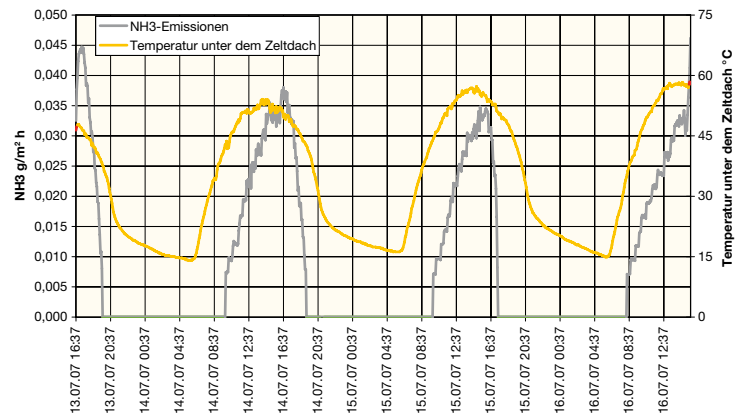


Abb. 2. Versuch mit Rindergülle 2007. Die Korrelation zwischen den  $\text{NH}_3$ -Emissionen und der Temperatur unter dem Zeltdach ist deutlich ersichtlich (Gülletemperatur  $17,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

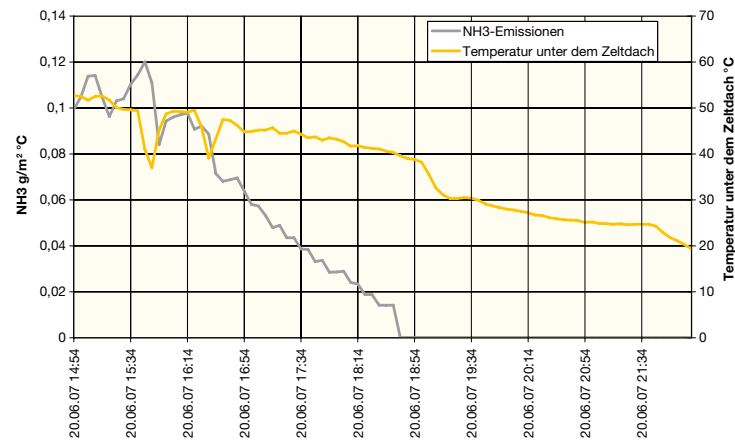


Abb. 3. Versuch mit Rindergülle 2007. Bei lang anhaltender hoher Lüftungsrate ( $640 \text{ m}^3/\text{h}$ ) geht die Emissionsrate für  $\text{NH}_3$  zurück.

unter dem Zeltdach  $<20 \text{ }^\circ\text{C}$ ) als vor dem Rühren.

## Diskussion

Die maximal gemessenen Methanemissionen während einer Stunde ( $>35 \text{ g/m}^2 \text{ h}$ ) übertreffen Literaturangaben aus früheren Laborversuchen ( $1,6 \text{ g/m}^2 \text{ h}$ , Hüther, 1999) um ein Vielfaches.

Die  $\text{CH}_4$ - und  $\text{CO}_2$ -Emissionen nehmen mit steigender Gülletemperatur zu.

Die Temperatur unter dem Zeltdach (bis zu  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ ) wirkt sich stark auf die  $\text{NH}_3$ - (Anstieg auf das 3 bis 10-fache) und mässig auf die  $\text{CH}_4$ - und  $\text{CO}_2$ -Emissionen aus.

Die Begrenzung des Luftaustauschs an der Gülleoberfläche reduziert wirksam die Ammoniakemissionen, die Kohlenstoffdioxid- und Methanemissionen jedoch nur begrenzt. Bei langanhaltender hoher Lüf-

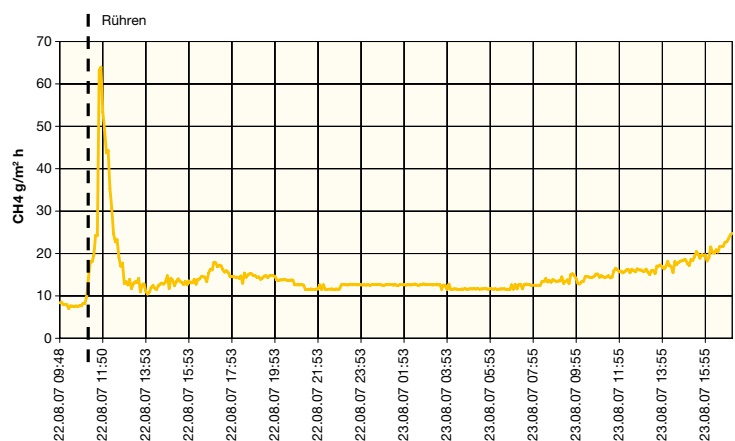
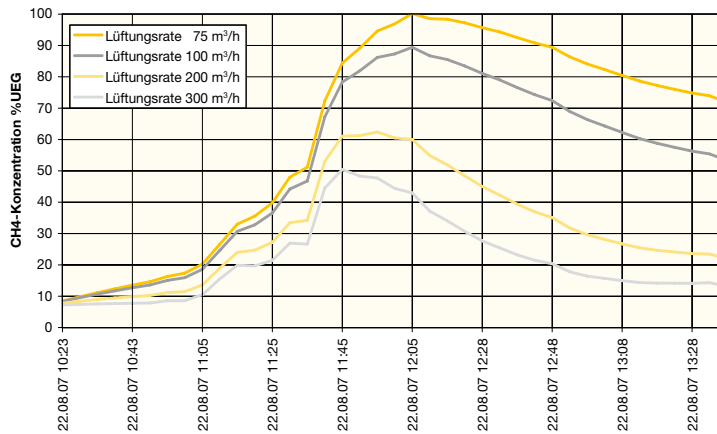


Abb. 4. Versuch mit Rindergülle 2007. Etwa 45 Minuten nach Rühranfang erreicht die Methanfreisetzung einen Spitzenwert von  $63 \text{ g/m}^2 \text{ h}$  (entspricht  $32 \%$ -UEG).



**Abb. 5. Hypothetischer Verlauf der Methankonzentration bei unterschiedlichen Lüftungsraten und vollem Behälter (Ø 11,3 m) aufgrund der Emissionsdaten in Abbildung 4.**



tungsrate von  $6,5 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ h}$  sinkt bei Rindergülle auch die Ammoniakkonzentration im Abluftstrom ab, was darauf hinweist, dass die Ammoniakemissionen über längere Perioden nicht unbeschränkt mit steigender Lüftungsrate zunehmen können, sondern durch die Freisetzungsrates aus der Gülle limitiert werden.

■ Die gute Bremswirkung der natürlichen Schwimmschicht wird durch den starken Anstieg der Ammoniakfreisetzung nach Zerstörung der natürlichen Schwimmschicht bewiesen.

■ Die Ammoniakemissionen sind bei Schweinegülle (0 bis  $0,73 \text{ g}/\text{m}^2 \text{ h}$  oder  $0,21 \text{ g}/\text{m}^3 \text{ h}$ ) etwa fünf mal höher als bei Rindergülle (0 bis  $0,15 \text{ g}/\text{m}^2 \text{ h}$  oder  $0,043 \text{ g}/\text{m}^3 \text{ h}$ ). Dies kann nur teilweise durch den höheren N-Gehalt der Schweinegülle erklärt werden. Das Fehlen einer natürlichen Schwimmschicht ist vermutlich der Hauptgrund für die höheren Emissionen.

Frühere Versuche an einem offenen Behälter mit Durchmesser 2,5 m und Tiefe 2,5 m ergaben für Rindergülle Ammoniakemissionen von durchschnittlich  $0,030 \text{ g}/\text{m}^3 \text{ h}$  im Winter und von  $0,033 \text{ g}/\text{m}^3 \text{ h}$  im Sommer (Amon *et al.*, 2005). Nach Abdeckung mit einer Holzdecke reduzierten sich die Emissionen im Winter auf  $0,022 \text{ g}/\text{m}^3 \text{ h}$  und im Sommer auf  $0,018 \text{ g}/\text{m}^3 \text{ h}$ . Die Methanemissionen betragen in diesem Versuch durchschnittlich  $0,07 \text{ g}/\text{m}^3 \text{ h}$  im Winter und  $1,07 \text{ g}/\text{m}^3 \text{ h}$  im Sommer.

#### Erforderliche minimale Lüftungsrate

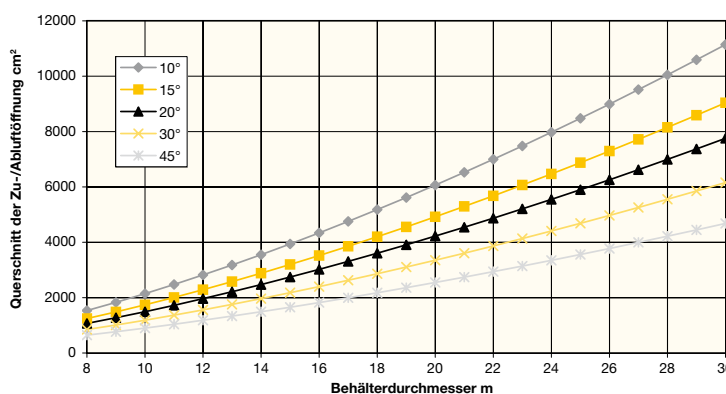
Die Bemessung der minimalen Lüftungsrate erfolgte aufgrund der maximalen Emissionsraten für Methan. Diese traten während des Rührens auf (Abb. 4). Wie hoch die Methangaskonzentration unter einem Zeltdach ansteigt, hängt weniger von der Höhe der Spitzenwerte der Emissionen, sondern mehr von deren Dauer und Verlauf ab. Dabei

spielen das Volumen unter dem Zeltdach und die Lüftungsrate eine wesentliche Rolle. Da bei allen Messreihen der Güllebehälter bis auf 0,5 m unter den Rand gefüllt war, betrug das rechnerisch ermittelte Leervolumen unter der Plane  $157 \text{ m}^3$ . Das Volumen würde sich auf  $107 \text{ m}^3$  reduzieren, wenn der Behälter bis zum Rand gefüllt wäre. Mit Hilfe der Gleichungen III und IV kann aus dem Verlauf der Methanemissionen beim Rühren (Abb. 4) die hypothetische Methankonzentration bei unterschiedlichen Lüftungsraten und vollem Behälter berechnet werden (Abb. 5). Es zeigt sich, dass für diese Bedingungen die untere Explosionsgrenze (UEG) überschritten wird, wenn die Lüftungsrate unter  $75 \text{ m}^3/\text{h}$  sinkt. Begrenzt man die zulässige Methangaskonzentration auf 50 %-UEG (Sicherheitsfaktor: 2) ist für diesen Verlauf der Methanfreisetzung eine Lüftungsrate von  $300 \text{ m}^3/\text{h}$  oder  $3 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ h}$  erforderlich. Diese Lüftungsrate wurde der Bemessung der Lüftungsöffnungen zugrunde gelegt.

#### Erforderliche minimale Lüftungsöffnungen

Die Lüftungsöffnungen sind so zu bemessen, dass zu jeder Zeit bei natürlicher Lüftung eine Lüftungsrate von mindestens  $3 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ h}$  gewährleistet ist. Nimmt man als Bemessungswert für die Temperaturdifferenz zwischen dem Luft-Gasgemisch unter dem Zeltdach und der Aussenluft  $3 \text{ °C}$  an, lässt sich der erforderliche Querschnitt der Abluftöffnung in der Dachspitze und der Zuluftöffnungen im Randbereich in Abhängigkeit des Behälterdurchmessers und der Dachneigung mit Hilfe von Gleichung (VI) berechnen. Er beträgt beispielsweise für einen Güllebehälter mit 12 m Durchmesser und einer Dachneigung von  $30^\circ$   $1560 \text{ cm}^2$  (Abb. 6). Dies entspricht einer kreisförmigen Öffnung in der Dachspitze von

**Abb. 6. Erforderlicher Querschnitt der Zuluft- beziehungsweise Abluftöffnungen zur Sicherstellung der minimalen Lüftung ( $3 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ h}$ ) bei Zeltdächern über Güllebehältern in Abhängigkeit des Durchmessers und der Dachneigung (10–45°).**



45 cm. Der gesamte Querschnitt der Zuluftöffnungen sollte etwa gleich gross wie die Abluftöffnung sein und sich auf mindestens zwei gegenüberliegende Löcher im Randbereich verteilen. Es lässt sich berechnen, dass auch bei einer Temperaturdifferenz von 1 °C statt 3 °C, die untere Explosionsgrenze nicht überschritten wird. In diesem Fall reduziert sich die Lüftungsrate um einen Faktor  $\sqrt{3}$ , beispielsweise für den Versuchsbehälter (Ø 11,3 m) auf 173 m<sup>3</sup>/h. Bei dieser Luftmenge beträgt die Methankonzentration 68 %-UEG (Abb. 5).

### Wirksamkeit der Zeldachabdeckung

Die Bemessung der Öffnungen für ungünstigste Wetterbedingungen (keine Sonneneinstrahlung und kein Wind) bedingt, dass während des grössten Teils des Jahres, der Luftwechsel weit über dem Minimalwert liegt (3 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>h). So beträgt bei einer

Temperaturdifferenz von 30 °C zwischen der Aussenluft und dem Luft-Gasgemisch unter dem Zeldach die theoretische Lüftungsrate mehr als 9 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> h. Bei einer mässigen Windgeschwindigkeit von 30 km/h (8,3 m/s) nimmt der Luftwechsel auf etwa 18 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> h zu. Die gross dimensionierten Lüftungsöffnungen, die aus Sicherheitsgründen notwendig sind, schmälern folglich das Emissionsminderungspotenzial des Zeldachs erheblich.

### Literatur

■ Amon B., Kryvoruchko V., Amon T. & Boxberger J., 2005. Lagerung von Milchviehflüssigmist. Landtechnik 4/2005, S. 216-217.

■ Berg W., Hörmig G. & Wanka U., 2002. Ammoniak-Emissionen bei der Lagerung von Fest- und Flüssigmist sowie Minderungsmassnahmen. KTBL Schrift 406, Emissionen der Tierhaltung – Grundlagen, Wirkungen, Minderungsmassnahmen, S.151-161.

■ Dunja D., Van Caenegem L., Steiner B. & Kaufmann R., 2005. Kosteneffizienz von Güllebehälter-Abdeckungen. FAT-Berichte 642, Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, CH-8356 Ettenhausen.

■ Hüther L., 1999. Entwicklung analytischer Methoden und Untersuchung von Einflussfaktoren auf Ammoniak-, Methan- und Distickstoffoxidemissionen aus Flüssig- und Festmist. Landbauforschung, D-Völklerode, Sonderheft 200.

■ Van Caenegem L. & Wechsler B., 2000. Stallklimawerte und ihre Berechnung. FAT-Schriftenreihe Nr. 51, Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, CH-8356 Ettenhausen.

■ Van Caenegem L., Steiner B., Dux D. & Kaufmann R., 2005. Emila, Emissionsminderung bei der Lagerung. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL (heute Bundesamt für Umwelt BAFU), Bern.

## RÉSUMÉ

### L'aération des silos à lisier à toit conique permet de réduire les émissions de gaz

Pour l'agriculture, les émissions d'ammoniac représentent une perte d'engrais azotés. En outre, elles polluent l'environnement. Une partie de ces pertes se produit lors du stockage du lisier. Pour les réduire, on exige désormais que les nouveaux silos à lisier aient une couverture artificielle. Les toits coniques et les bâches flottantes sont les deux systèmes qui se sont imposés comme couverture artificielle. Plus la couverture est étanche, plus elle réduit efficacement les émissions. Toutefois, il faut veiller à ce qu'aucun mélange de gaz explosifs ne se forme sous la couverture. C'est le cas, lorsque la concentration de méthane se situe entre 4,4 et 16,5 vol.-%. Un échange d'air minimum doit donc permettre d'éviter qu'une telle concentration ne soit atteinte.

Quel doit être le taux d'aération minimum ? Cela dépend du taux maximum d'émission de méthane. Or, ce dernier est le fruit de plusieurs facteurs : la consistance et la température du lisier, la température sous le toit conique et l'épaisseur d'éventuelles croûtes flottantes naturelles. L'impact de ces facteurs sur la libération des gaz dans des conditions pratiques était jusqu'à présent inconnu.

C'est pourquoi des mesures des émissions issues d'un silo à lisier avec toit conique ont été effectuées à ART dans différentes conditions extérieures et avec différents taux d'aération. On a relevé à la fois la concentration de méthane et la concentration d'ammoniac et de dioxyde de carbone dans le flux d'air sortant. Les résultats de ces mesures ont permis d'établir des débits d'aération minimums. A partir de là, il est possible de calculer la section nécessaire pour les ouvertures d'aération des silos à lisier avec toit conique afin d'assurer la sécurité des installations.

## SUMMARY

### Tent-roof ventilation reduces emissions effect in slurry containers

Ammonia emissions mean a loss of nitrogen fertilisers for agriculture. They also pollute the environment. Part of the losses occur during slurry storage. In order to reduce these losses, artificial covers are required for new slurry containers. Tent roofs and floating foils in particular have caught on as artificial covers. The less permeable the cover, the more effectively it reduces emissions. Apart from this, no explosive gas-air mixture must be allowed to evolve under the cover, as happens when the methane concentration lies between 4.4 and 16.5 volume per cent (vol. %). A minimum air exchange must therefore prevent this concentration from being reached.

Just how high the minimum ventilation rate must be depends on the maximum methane emission rate. The latter is influenced by several factors such as the qualities and temperature of the slurry, the temperature under the tent roof, and the thickness of any natural floating layers. How these factors affect the release of gas under practical conditions is to date unknown.

For this reason, emission measurements were performed at a slurry silo with a tent roof at the ART for different external conditions and ventilation rates. Both the methane concentration as well as the ammonia and carbon dioxide concentration in the outgoing air flow were measured. The measurement results allowed us to deduce the minimum ventilation rate. From this, the necessary cross-section of the ventilation openings for any slurry containers with a tent roof can be calculated with a view to safe operation.

**Key words:** emissions, slurry, methane, explosion