

# Wageningen UR Livestock Research

*Partner in livestock innovations*



Rapport 554

## Metingen aan een experimentele biologische luchtwasser met denitrificatie bij een vleesvarkenstal

November 2012



**LIVESTOCK RESEARCH**  
**WAGENINGEN UR**

## Colofon

### Uitgever

Wageningen UR Livestock Research  
Postbus 65, 8200 AB Lelystad  
Telefoon 0320 - 238238  
Fax 0320 - 238050  
E-mail [info.livestockresearch@wur.nl](mailto:info.livestockresearch@wur.nl)  
Internet <http://www.livestockresearch.wur.nl>

### Redactie

Communication Services

### Copyright

© Wageningen UR Livestock Research, onderdeel van Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek, 2012

Overname van de inhoud is toegestaan, mits met duidelijke bronvermelding.

### Aansprakelijkheid

Wageningen UR Livestock Research aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Wageningen UR Livestock Research en Central Veterinary Institute, beiden onderdeel van Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek vormen samen met het Departement Dierwetenschappen van Wageningen University de Animal Sciences Group van Wageningen UR (University & Research centre).

Losse nummers zijn te verkrijgen via de website.



De certificering volgens ISO 9001 door DNV onderstreept ons kwaliteitsniveau. Op al onze onderzoeksopdrachten zijn de Algemene Voorwaarden van de Animal Sciences Group van toepassing. Deze zijn gedeponeerd bij de Arrondissementsrechtbank Zwolle.

## Abstract

The performance of an experimental biotrickling filter with denitrification unit was investigated during 18 months on a fattening pig house. In this report the removal efficiencies of the scrubber are reported for ammonia, odour and fine dust (PM10 and PM2.5). Also measurements of N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> are reported. Finally a nitrogen balance of the system is performed.

## Keywords

Bioscrubber, biotrickling filter, scrubber, denitrification, livestock, ammonia, odour, fine dust, PM10, PM2.5, nitrous oxide

## Referaat

ISSN 1570 - 8616

## Auteurs

R.W. Melse  
J.M.G. Hol  
G.M. Nijeboer

## Titel

Metingen aan een experimentele biologische luchtwater met denitrificatie bij een vleesvarkenstal

Rapport 554

## Samenvatting

De werking van een experimentele biologische luchtwater met denitrificatie-unit is gedurende 18 maanden op een vleesvarkenstal. In dit rapport worden de verwijderingsrendementen van de water gepresenteerd voor ammoniak, geur en fijnstof (PM10 en PM2.5); ook worden metingen van N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> en CO<sub>2</sub> gerapporteerd. Tenslotte wordt een stikstofbalans opgesteld over het systeem.

## Trefwoorden

Combi-wasser, gecombineerde luchtwater, biowasser, denitrificatie, veehouderij, ammoniak, geur, fijnstof, PM10, PM2.5, lachgas



LIVESTOCK RESEARCH  
WAGENINGEN UR

Rapport 554

Metingen aan een experimentele biologische  
luchtwasser met denitrificatie bij een  
vleesvarkenstal

Measurements on a bioscrubber system with  
denitrification at a fattening pig house

R.W. Melse

J.M.G. Hol

G.M. Nijeboer

November 2012



## **Voorwoord**

In het kader van het door het Ministerie van Economische Zaken (EZ) en het Ministerie van Infrastructuur en Milieu (IenM) opgezette Programma Gecombineerde Luchtwassers (PGL) heeft Wageningen UR Livestock Research (WUR LR) een aantal onderzoeken uitgevoerd naar de werking van experimentele luchtwassersystemen voor stalluchtbehandeling.

In voorliggend rapport worden de resultaten gepresenteerd van een vervolgonderzoek naar een biologische luchtwasser die uitgerust is met een denitrificatie-systeem.

We willen de betrokken veehouder (Mts Beltman, Lievelede) en luchtwasserleverancier (Dorset Farm Systems b.v., Aalten) van harte bedanken voor de medewerking aan het project.

Roland Melse  
Wageningen UR Livestock Research



## Samenvatting

In de periode 2007 - 2011 is binnen het kader van het door de Ministeries van Economische Zaken (EZ) en het Ministerie van Infrastructuur en Milieu (IenM) opgezette Programma Gecombineerde Luchtwassers (PGL) door Wageningen UR Livestock Research (WUR-LR) een monitoringsonderzoek uitgevoerd naar de werking van een aantal experimentele gecombineerde luchtwassers voor de behandeling van ventilatielucht van stallen.

In onderliggend rapport worden de metingen aan een van deze luchtwassers gerapporteerd. Het betreft een biologische luchtwasser die uitgerust is met een denitrificatiesysteem en de ventilatielucht van een vleesvarkensstal behandelt. In de biologische luchtwasser vindt allereerst nitrificatie plaats, d.w.z. dat de ingevangen ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) wordt omgezet in nitriet ( $\text{NO}_2^-$ ) en/of nitraat ( $\text{NO}_3^-$ ). Vervolgens is het de bedoeling dat in het denitrificatiesysteem het gevormde nitriet en/of nitraat wordt omgezet naar stikstofgas ( $\text{N}_2$ ). Vervolgens kan het water worden gerecirculeerd zodat de netto spuiwaterhoeveelheid kan worden teruggebracht. In een eerdere reeks metingen werd geconcludeerd dat het systeem niet goed werkte, waarna het ontwerp van het biologische luchtwassersysteem is aangepast en een nieuwe reeks metingen is uitgevoerd. In onderliggend rapport worden deze nieuwe metingen gerapporteerd.

Tijdens de metingen aan het aangepaste biologische luchtwassersysteem met denitrificatie werd voor de verwijdering van ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) een gemiddeld rendement van 85% ( $n=7$ ;  $sd=16$ ) gevonden. Voor de verwijdering van geur werd een gemiddeld rendement van 48% ( $n=7$ ;  $sd=11$ ) gevonden. Tenslotte werd voor de verwijdering van fijnstof ( $\text{PM}_{10}$ ) een gemiddeld rendement van 69% ( $n=7$ ;  $sd=6,4$ ) gevonden. Vanwege de lage concentraties kon het verwijderingsrendement voor  $\text{PM}_{2.5}$  niet worden vastgesteld. De gemiddelde luchtverblijftijd in het pakkingsmateriaal van de luchtwasser bedroeg 3,6 seconden.

De concentraties van methaan ( $\text{CH}_4$ ) en kooldioxide ( $\text{CO}_2$ ) in ingaande en uitgaande lucht waren gelijk.

De concentratie van lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ) in de lucht nam toe van gemiddeld 0,55 ppm in de ingaande lucht naar gemiddeld 4,3 ppm in de uitgaande lucht. In systemen waarin nitrificatie en/of denitrificatie plaatsvindt kan enige productie van lachgas worden verwacht; in dit geval is de productie echter aanzienlijk te noemen.

Op basis van de metingen van ammoniak, lachgas en stikstofgehalten in het waswater is tenslotte een massabalans opgesteld voor de verwijdering van stikstof uit het systeem. Daaruit wordt geconcludeerd dat waarschijnlijk ca. 56% van de aangeboden  $\text{NH}_3\text{-N}$  wordt gedenitrificeerd, dat wil zeggen dat dit deel van de stikstof het luchtwassersysteem uiteindelijk via de lucht verlaat als  $\text{N}_2$  en  $\text{N}_2\text{O}$  en mogelijk enig  $\text{NO}_x$ . Uit de metingen volgt verder dat gemiddeld 24% van de aangeboden  $\text{NH}_3\text{-N}$  wordt omgezet in  $\text{N}_2\text{O}$ . Aanbevolen wordt om nader onderzoek te doen naar de manier waarop de productie van lachgas kan worden verlaagd.

De overige stikstof wordt afgevoerd via het spuiwater (ammonium, nitriet en nitraat) en als in de lucht resterende  $\text{NH}_3$ , aangezien het ammoniakverwijderingsrendement lager is dan 100%.

Als gevolg van de toepassing van het denitrificatiesysteem kon het spuiwaterdebiet met een factor 3 gereduceerd worden ten opzichte van een biologische luchtwasser zonder denitrificatie. Het stikstofgehalte van het spuiwater bedroeg gemiddeld 3,4 g/liter.





## Summary

Wageningen UR Livestock Research (WUR-LR) has been commissioned by the Dutch Ministry of Infrastructure and the Environment (IenM) and the Ministry of Economic Affairs (EZ) to perform a measurement program in order to determine the performance characteristics of several experimental air scrubbers at animal farms. The measurement program is part of a research program called Programma Gecombineerde Luchtwaters (PGL) which has been established by these ministries. In this report the monitoring of one of these scrubbers is described. The air scrubber is a biotrickling filter (or: bioscrubber) which treats the exhaust air of a fattening pig house. Furthermore, the scrubbing water is treated in a denitrification reactor and recirculated in order to reduce the net amount of discharge water from the system. In a bioscrubber that treats ammonia ( $\text{NH}_3$ ) containing air, conversion of ammonia to nitrite ( $\text{NO}_2^-$ ) and nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) takes place ('nitrification'). Next the nitrite and/or nitrate is supposed to be converted to mainly dinitrogen ( $\text{N}_2$ ) gas ('denitrification'). From a previous series of measurements on the air scrubber system it was concluded that the installation was not running properly. Therefore the design was adapted. In the underlying report a new series of measurements is reported that has been carried out on the adapted system.

The ammonia removal efficiency of the bioscrubber system was on average 85% ( $n=7$ ;  $sd=16$ ). The odour removal efficiency was on average 48% ( $n=7$ ;  $sd=11$ ). The fine dust (PM10) removal efficiency was on average 69% ( $n=7$ ;  $sd=6.4$ ). Due to the low concentrations the removal efficiency of PM2.5 could not be determined. The air residence time in the packing material of the scrubber was on average 3.6 seconds during the measurements.

The concentrations of methane ( $\text{CH}_4$ ) and carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ) in the air were not affected by the scrubber.

The concentration of nitrous oxide ( $\text{N}_2\text{O}$ ) increased from on average 0.55 ppm in the inlet air to on average 4.3 ppm in the outlet air of the scrubber. In systems where nitrification and denitrification take place some production of  $\text{N}_2\text{O}$  can be expected; the increase that was measured here can be considered as substantial, however.

Based on the measurements of ammonia and nitrous oxide in the inlet and outlet air and nitrogen content of the water an indicative mass balance for nitrogen was calculated. From the mass balance it follows that probably about 56% of the  $\text{NH}_3\text{-N}$  entering the scrubber leaves the system as gaseous compounds ( $\text{N}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  en possibly some  $\text{NO}_x$ ). On average 24% of the ammonia that enters the scrubber is converted to nitrous oxide. It is recommended to perform further research aiming to find out how the production of nitrous oxide can be decreased.

The remaining nitrogen is partly discharged with the water (as ammonium, nitrite and nitrate) and partly emitted as ammonia, as the ammonia removal efficiency is below 100%. As a result of the application of the denitrification reactor the amount of discharge water could be reduced by a factor 3 as compared to a bioscrubber without denitrification. The nitrogen content of the discharge water was on average 3.4 g/litre.



# Inhoudsopgave

Voorwoord

Samenvatting

Summary

<b>1</b>	<b>Inleiding .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Materiaal en methoden .....</b>	<b>2</b>
2.1	Algemeen .....	2
2.2	Beschrijving van biologische luchtwasser met denitrificatie .....	2
2.3	Metingen .....	6
<b>3</b>	<b>Resultaten en discussie .....</b>	<b>8</b>
3.1	Diergegevens en ventilatiedebiet.....	8
3.2	Rendementsmetingen ammoniak .....	8
3.3	Rendementsmetingen geur.....	9
3.4	Rendementsmetingen fijnstof .....	9
3.5	Broeikasgasmetingen.....	10
3.6	Metingen temperatuur en relatieve vochtigheid.....	10
3.7	Analyses water.....	11
3.8	Metingen waterverbruik, elektraverbruik en spuiwaterproductie.....	12
3.9	Stikstofbalans en werking denitrificatie .....	12
<b>4</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen.....</b>	<b>14</b>

Referenties

Bijlage 1: Meetmethoden



## 1 Inleiding

De intensieve veehouderij in Nederland is verantwoordelijk voor de emissie van ammoniak, geur en fijnstof (PM10, PM2.5). De genoemde emissies zijn nadelig voor de kwaliteit van de natuur en leefomgeving en belemmeren in sommige gevallen de ontwikkelingen in het landelijk gebied. Om deze problemen aan te pakken zetten de Ministeries van Infrastructuur en Milieu (IenM) en van Economische Zaken (EZ) onder andere in op toepassing en verdere ontwikkeling van de techniek van luchtwassersystemen voor de behandeling van ventilatielucht van stallen. In dit kader is door deze ministeries een programma opgezet, genaamd Programma Gecombineerde Luchtwassers (PGL). Als onderdeel van dit programma heeft Wageningen UR Livestock Research (WUR LR) een monitoringsonderzoek uitgevoerd naar de werking van een aantal experimentele gecombineerde luchtwassers, waarvan de resultaten worden gerapporteerd in Melse et al. (2011). In dat rapport wordt onder andere een gecombineerde luchtwasser beschreven (pilot 4) die wordt toegepast voor de behandeling van de ventilatielucht van een vleesvarkensstal. Het betreft een biologische luchtwasser die uitgerust is met een denitrificatiesysteem. In de biologische luchtwasser vindt allereerst nitrificatie plaats, d.w.z. dat de ingevangen ammoniak wordt omgezet in nitraat en/of nitriet. Vervolgens is het de bedoeling dat in het denitrificatiesysteem het gevormde nitraat en/of nitriet wordt omgezet naar stikstofgas (N<sub>2</sub>). Toepassing van het denitrificatiesysteem zou er toe moeten leiden dat de hoeveelheid spuiwater sterk wordt gereduceerd ten op zichte van een biologische luchtwasser waarin alleen nitrificatie plaatsvindt.

In het onderzoek van Melse et al. (2011) bleek dat het denitrificatie-systeem van deze luchtwasser niet goed functioneerde met als gevolg dat de hoeveelheid spuiwater veel groter was dan beoogd.

Naar aanleiding van deze bevindingen is vervolgens de omvang van de denitrificatiereactor vergroot en is de installatie uitgerust met een spuiregeling op basis van geleidbaarheid.

Vervolgens is een nieuwe reeks metingen uitgevoerd aan de luchtwasser. In het voorliggende rapport worden deze metingen gerapporteerd. Evenals het eerdere onderzoek zijn ook deze metingen uitgevoerd in opdracht van de ministeries IenM en EZ.

## 2 Materiaal en methoden

### 2.1 Algemeen

Onderstaand wordt een beschrijving gegeven van de luchtwasser waaraan het onderzoek is uitgevoerd. De luchtwasser is niet in de Regeling ammoniak en veehouderij (Rav) (Staatscourant, 2012) opgenomen en heeft een experimentele status. Het betreft een "full scale" systeem dat de ventilatielucht van een gehele stal behandelt. In een eerder onderzoek (zie Melse et al., 2011) is reeds gemeten aan een eerder prototype van het systeem. Naar aanleiding van dat onderzoek is het ontwerp van het denitrificatiesysteem aangepast, wat heeft geresulteerd in het ontwerp dat in de volgende paragraaf wordt beschreven.

### 2.2 Beschrijving van biologische luchtwasser met denitrificatie

#### *Aantal dieren en ventilatiedebiet*

De luchtwasser behandelt lucht afkomstig van een vleesvarkensstal met 2.600 vleesvarkensplaatsen. Het hokoppervlak bedraagt 0,8 m<sup>2</sup> per dier.

De maximale capaciteit van de luchtwasser, gebaseerd op een ventilatiecapaciteit van 60 m<sup>3</sup>/vleesvarken/uur, bedraagt 160.000 m<sup>3</sup>/uur.

#### *Beschrijving luchtwasser*

De gecombineerde wasser bestaat uit twee onderdelen:

- 1) een luchtwasser conform de in de Rav opgenomen gecombineerde wasser BWL 2007.02.V1, bestaande uit 2 aparte biowasser-units;
- 2) een denitrificatie-unit voor de behandeling van de spuiwaterstroom afkomstig uit de wasser.

In Figuur 1 staat een schematische weergave van het systeem, Figuur 2 is een foto van de bovenzijde van het pakkingsmateriaal in de wasser en Figuur 3 is een foto van de denitrificatie-unit.

De lucht afkomstig uit het centrale ventilatiekanaal wordt gesplitst in twee stromen die elk naar een aparte biowasser-unit worden geleid. De wassers zijn van het tegenstroom principe. De beide biowassers (Wasser 1 en Wasser 2) bevinden zich in het stalgebouw en delen samen één waswaterbassin. Het waswater wordt gerecirculeerd over het pakkingsmateriaal van beide biowassers, waarna het water terugvalt in het waswaterbassin. In het pakkingsmateriaal wordt contact bewerkstelligd tussen lucht en water zodat de verontreinigingen kunnen worden ingevangen in de waterfase. In de biowassers zal nitrificatie van ammoniak plaatsvinden en een deel van de geurcomponenten en het (fijn)stof worden afgevangen uit de luchtstroom.

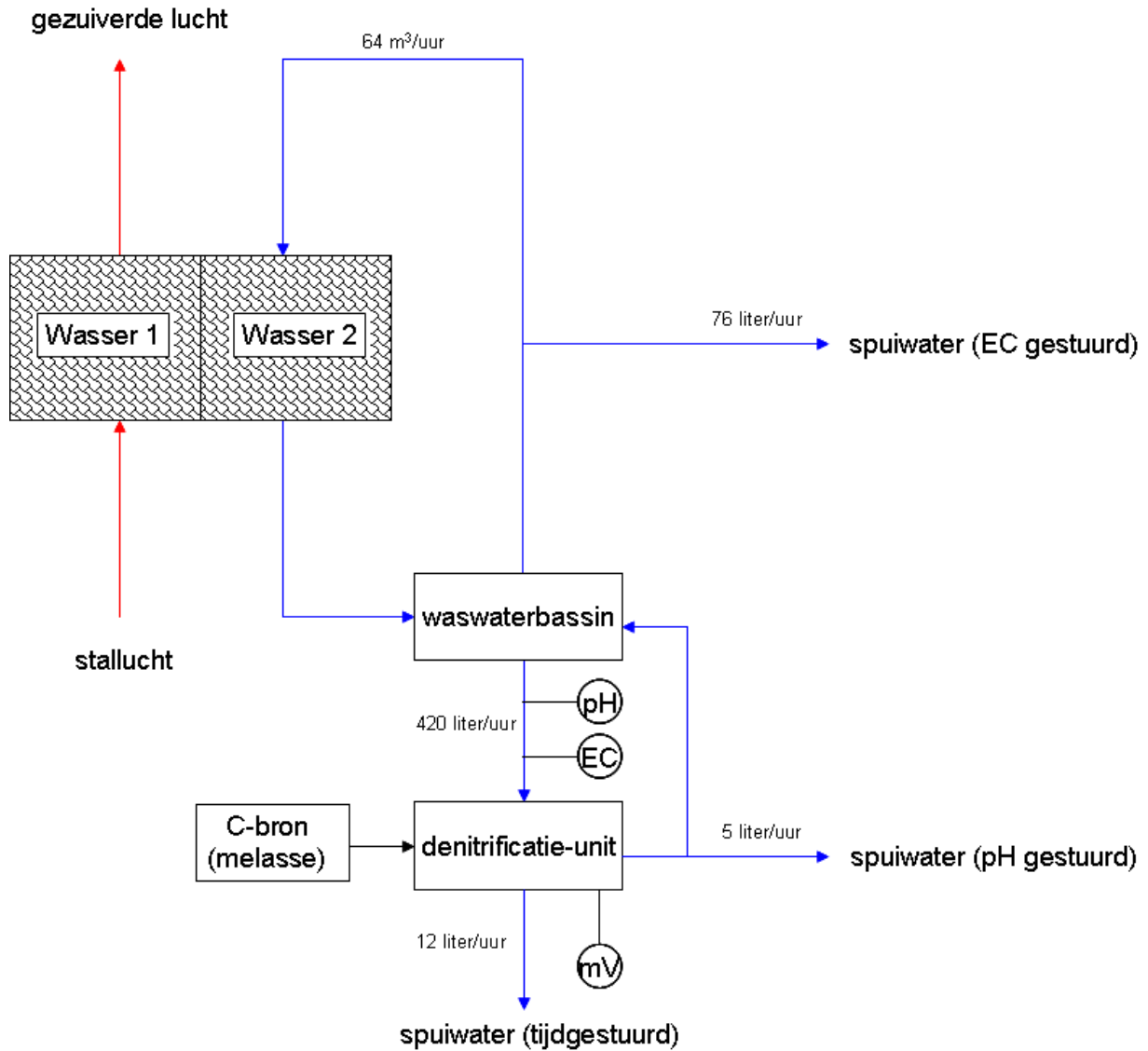
Het pakkingsvolume voor elke biowasser bedraagt 36 m<sup>3</sup>, dus in totaal 2 x 36 = 72 m<sup>3</sup> en heeft een dikte van 0,9 m. Het aanstroomoppervlak is 40 m<sup>2</sup> per biowasser, dus in totaal 80 m<sup>2</sup>. Het pakkingsmateriaal wordt continu besproeid met ca. 800 liter water per m<sup>2</sup> per uur, dus in totaal 80 m<sup>2</sup> x 800 l/m<sup>2</sup>/uur = 64 m<sup>3</sup>/uur. Uitgaand van een maximaal luchtdebiet van 160.000 m<sup>3</sup>/uur bedraagt de minimale luchtverblijftijd (op basis van een lege ruimte) in het pakkingsmateriaal dus 1,6 seconden. Daarnaast wordt de lucht bevochtigd in de ruimte boven het pakkingsmateriaal (waar de sproeiers zich bevinden) en in de ruimte onder de wassers (waar het water uit het pakkingsmateriaal druppelt). Deze ruimtes hebben een volume van respectievelijk 30 m<sup>3</sup> en 40 m<sup>3</sup> per biowasser, dus in totaal (2 biowassers) een totaal volume van nog eens 60 m<sup>3</sup> en 80 m<sup>3</sup>. Wanneer deze ruimtes worden meegeteld bij de luchtverblijftijd wordt de minimale luchtverblijftijd driemaal zo hoog, namelijk 4,8 seconden (bij een debiet van 160.000 m<sup>3</sup>/uur).

Het waswater van de twee biowassers wordt vanaf het waswaterbassin (ca. 30 m<sup>3</sup> per biowasser, dus in totaal 60 m<sup>3</sup>) via een instelbare debietregelaar naar een separate denitrificatie-unit (ca. 11,5 m<sup>3</sup>) geleid waar het gevormde nitraat en/of nitriet uit het waswater dient te worden verwijderd middels denitrificerende bacteriën. In het eerdere prototype (zie Melse et al., 2011) had de denitrificatie-unit een omvang van slechts 9 m<sup>3</sup>. Aan de denitrificatie-reactor wordt melasse toegediend als koolstofbron voor de bacteriën. Vervolgens wordt het relatief stikstof-arme water via een kegelvormige bezinkingstank (ca. 2,3 m<sup>3</sup>) teruggevoerd naar de biowasser.

Als gevolg van de optredende denitrificatie kan de hoeveelheid spuiwater verminderd worden ten opzichte van een conventionele biowasser waarbij alleen sprake is van nitrificatie. De redoxpotentiaal van het water in de denitrificatiereactor wordt continu gemeten. Een ingesteld redox-streefwaarde (-170 mV) bepaalt de tijdsduur van de melassedosering; als gevolg van de toevoeging van melasse daalt de redoxpotentiaal. De melassedosering neemt af als de gemeten redoxwaarde richting streefwaarde gaat en neemt toe als de gemeten redoxwaarde verder van de streefwaarde af komt te liggen; de melassedosering stopt wanneer de streefwaarde wordt bereikt. Tevens wordt de melassedosering gestopt wanneer de pH in het waswater boven een waarde van 7,6 komt. Vanuit de kegelvormige bezinkingstank wordt een vaste hoeveelheid water gespuid (tijdgestuurd, ca. 12 l/uur). Verder wordt wanneer de pH van het waswater te hoog is, d.w.z. hoger dan 7,8, nog een hoeveelheid water gespuid vanuit de retourleiding die van de denitrificatie-unit naar het waswaterbassin loopt (pH gestuurd, gemiddeld ca. 5 l/uur); de pH streefwaarde is 7,7 tot 7,8.

Daarnaast is een EC meter geïnstalleerd in de waterstroom van het waswaterbassin naar de denitrificatie-unit op basis waarvan water wordt gespuid (EC gestuurd, gemiddeld ca. 76 l/uur). Door de EC te meten, wat een maat is voor de ophoping van nitriet, nitraat en ammonium in het water, kan inzicht worden verkregen in de werking van de denitrificatie. Op grond van deze meting kan automatisch de grootte van de totale spuiroom worden aangepast zodat de condities in de waspakketten dusdanig blijven dat de ammoniakverwijdering geen gevaar loopt; de setpoint voor de EC is ingesteld op 19 mS/cm. Wanneer de EC van het water hoger is dan de setpoint, wordt er vanuit het waswaterbassin een extra hoeveelheid water gespuid waardoor meer vers water aan het systeem wordt toegevoegd. Het gevolg daarvan is dat de gemeten EC zal dalen. Wanneer de EC van het water lager is dan de setpoint, wordt alleen de ingestelde hoeveelheid water vanuit de denitrificatie-unit gespuid (tijdgestuurd) en wordt geen extra water vanuit het waswaterbassin gespuid (EC gestuurd). Hierdoor wordt minder vers water aan het systeem toegevoegd waardoor de EC weer kan stijgen. Op deze wijze wordt de hoeveelheid spuiwater geminimaliseerd en afgestemd op de daadwerkelijke ammoniakomzetting.

Ten behoeve van het onderzoek is een tweetal kWh meters aangebracht, een om het energieverbruik van de wassers (de pompen) te registreren en een om het energieverbruik van de denitrificatie-reactor te registreren. Daarnaast is een waterdoorstroommeter (rotameter) aanwezig waarop ter controle kan afgelezen worden hoeveel water over de wassers wordt versproeid. Verder wordt de consumptie van vers water en de productie van spuiwater geregistreerd. Met behulp van meetventilatoren wordt geregistreerd wat het luchtdebiet door de wasser is. De metingen van de verwijderingsrendementen voor ammoniak, geur en fijnstof zijn slechts aan één van de twee wassers uitgevoerd.



**Figuur 1** Schematische weergave van de experimentele biologische luchtwasser met denitrificatiesysteem. Het waterniveau in het waswaterbassin wordt aangevuld met vers water om te compenseren voor verdamping en spui; luchtstromen worden in rood en waterstromen in blauw weergegeven.





**Figuur 2** Bovenaanzicht van het pakkingsmateriaal (sproeiers zijn uitgeschakeld t.b.v. de foto) van de experimentele biologische luchtwasser met denitrificatiesysteem.



**Figuur 3** Denitrificatie-unit van de experimentele biologische luchtwasser met links de trechtersvormige bezinker en rechts de denitrificatie-reactor).

## 2.3 Metingen

Gedurende de onderzoeksperiode is tijdens een zevental bezoeken het verwijderingsrendement van het luchtwassysteem bepaald voor ammoniak, geur en fijnstof; daarnaast is de productie dan wel consumptie van broeikasgassen gemeten (methaan, lachgas en kooldioxide). In Tabel 1 wordt een en ander kort samengevat.

**Tabel 1** Toelichting metingen luchtwassysteem

Type meting	Korte omschrijving meetstrategie
Fijnstof (PM10 en PM2.5)	tijdsgemiddelde meting over 24 uur
Ammoniak	idem
Methaan	idem
Lachgas	idem
Kooldioxide	idem
Geur	tijdsgemiddelde meting over 2 uur

De gebruikte meetmethoden voor fijnstof, ammoniak, methaan, lachgas, kooldioxide en geur zijn gebaseerd op de protocollen zoals die zijn opgesteld door Ogink et al. (2011a, 2011b), Ogink (2011), Groenestein et al. (2011) en Mosquera et al. (2011) en worden beschreven in de Bijlage 1. De metingen van ammoniak werden in duplo uitgevoerd en de overige metingen (geur, fijnstof en broeikasgassen) in enkelvoud.

Het verwijderingsrendement voor deze componenten werd berekend door de concentratie van de betreffende component in de behandelde lucht ( $C_{\text{uitgaand}}$ ) te vergelijken met de concentratie van de betreffende component in de ingaande lucht van de wasser ( $C_{\text{ingaaand}}$ ). Hierbij werd de volgende formule gebruikt:

$$\text{Verwijderingsrendement} = \frac{C_{\text{ingaaand}} - C_{\text{uitgaand}}}{C_{\text{ingaaand}}} \times 100\%$$

Middels de Student-t-toets werd nagegaan of het gevonden gemiddelde rendement significant afweek van 0 ( $p < 0,05$ ).

Daarnaast werd met behulp van twee meetventilatoren het luchtdebiet door de luchtwasser gemeten en met behulp van een datalogger opgeslagen. De temperatuur ( $^{\circ}\text{C}$ ) en relatieve luchtvochtigheid (%) van de ingaande en uitgaande luchtstroom van de luchtwasser werden gemeten met behulp van temperatuur- en vochtsensoren.

Tijdens de uitvoering van het onderzoek werden tevens monsters genomen van het waswater en spuiwater die vervolgens geanalyseerd werden op pH, EC, droge stof, asrest, ammonium, nitraat, nitriet en totaal-stikstof gehalte.

### 3 Resultaten en discussie

#### 3.1 Diergegevens en ventilatiedebiet

In Tabel 1 wordt weergegeven op welke data de rendementsmetingen aan de luchtwasser zijn uitgevoerd; tevens wordt aangegeven wat het ventilatiedebiet op dat moment was.

**Tabel 1** Metingen aan een experimentele gecombineerde luchtwasser bij een vleesvarkenstal (n.b. = niet bepaald)

Datum	Luchtdebiet stal, 24-uurs gemiddelde (m <sup>3</sup> /uur) <sup>(1)</sup>			Luchtdebiet stal, 2-uurs gemiddelde (m <sup>3</sup> /uur) <sup>(3)</sup>
	Wasser 1	Wasser 2 <sup>(2)</sup>	Totaal (Wasser 1 + Wasser 2)	Wasser 1
14-jun-10	47.997	54019	102016	41.246
18-okt-10	28.950	n.b. <sup>(4)</sup>	n.b. <sup>(4)</sup>	30.601
20-dec-10	15.893	n.b. <sup>(4)</sup>	n.b. <sup>(4)</sup>	15.874
11-jul-11	54.330	58181	112511	52.918
27-sep-11	47.702	54613	102315	46.735
17-okt-11	34.373	40425	74798	31.262
07-dec-11	23.381	39855	63236	19.505

<sup>(1)</sup> Het 24-uurs gemiddelde debiet betreft de meting van ammoniak en fijnstof

<sup>(2)</sup> Aan Wasser 2 zijn geen rendementsmetingen uitgevoerd

<sup>(3)</sup> Het 2-uurs gemiddelde debiet betreft de meting van geur

<sup>(4)</sup> Ten gevolge van storing in de meetapparatuur kan geen waarde worden gerapporteerd.

Uit het 24-uurs gemiddelde luchtdebiet van de metingen in Tabel 1 kan berekend worden wat de gemiddelde luchtverblijftijd in Wasser 1 (waar de metingen van ammoniak, geur en fijnstof zijn uitgevoerd) was. De gemiddelde verblijftijd was 3,6 seconden in het pakkingsmateriaal en 7,0 seconden in de actief bevochtigde ruimte (onder en boven het pakket), dus in totaal 10,6 seconden.

#### 3.2 Rendementsmetingen ammoniak

In Tabel 2 worden de resultaten weergegeven van de ammoniakmetingen aan Wasser 1. Opgemerkt dient te worden dat eenmaal een geplande rendementsmeting (7 september 2011) is geannuleerd omdat de wasser buiten werking was vanwege een storing.

**Tabel 2** Ammoniakmetingen aan een experimentele gecombineerde luchtwasser bij een vleesvarkenstal (Wasser 1)

Datum	Ammoniak-in (ppm)	Ammoniak-uit (ppm)	Rendement (%)
14-jun-10	22	0,30	99
18-okt-10	34	0,13	100
20-dec-10	46	2,1	96
11-jul-11	15	6,7	56
27-sep-11	22	5,7	75
17-okt-11	29	4,7	84
07-dec-11	33	3,6	89

Uit Tabel 1 en 2 kan berekend worden dat de hoeveelheid ammoniak die Wasser 1 ingaat gemiddeld 4,3 kg NH<sub>3</sub>/dierplaats/jaar en de emissie na de wasser gemiddeld 0,6 kg NH<sub>3</sub>/dierplaats/jaar bedraagt. De belasting van de wasser is dus een stuk hoger dan de in de bijlage van de Rav gehanteerde emissiewaarde van 2,5 kg NH<sub>3</sub>/dierplaats/jaar voor 'overige huisvestingssystemen, hokoppervlak van maximaal 0,8 m<sup>2</sup> (D 3.100.1).

Uit Tabel 2 volgt dat er sprake is van een statistisch significante afname van de ammoniakconcentratie ( $p < 0,05$ ). Het gemiddelde ammoniakverwijderingsrendement bedraagt 85% ( $n=7$ ;  $sd=16$ ). Ten opzichte van de in de Rav gehanteerde waarde van 2,5 kg NH<sub>3</sub>/dierplaats/jaar betekent dit de emissie na de wasser 75% lager is.

### 3.3 Rendementsmetingen geur

In Tabel 3 worden de resultaten weergegeven van de geurmetingen aan Wasser 1. Opgemerkt dient te worden dat eenmaal een geplande rendementsmeting (7 september 2011) is geannuleerd omdat de wasser buiten werking was vanwege een storing.

**Tabel 3** Geurmetingen aan een experimentele gecombineerde luchtwasser bij een vleesvarkenstal (Wasser 1)

Datum	Geur-in (OU <sub>E</sub> /m <sup>3</sup> )	Geur-uit (OU <sub>E</sub> /m <sup>3</sup> )	Rendement (%)
14-jun-10	2.708	1.749	35
18-okt-10	1.817	1.160	36
20-dec-10	2.557	1.516	41
11-jul-11	2.335	1.009	57
27-sep-11	919	458	50
17-okt-11	1.414	501	65
07-dec-11	1.418	634	55

Uit Tabel 1 en 3 kan vervolgens berekend worden dat de hoeveelheid geur die Wasser 1 ingaat gemiddeld 13,6 OU<sub>E</sub>/dierplaats/s en de emissie na de wasser gemiddeld 7,2 OU<sub>E</sub>/dierplaats/s bedraagt. De geurbelasting van de wasser is dus een stuk lager dan de in de Regeling geurhinder en veehouderij (Rgv) gehanteerde emissiewaarde van 23 OU<sub>E</sub>/dierplaats/s voor 'overige huisvestingssystemen' (D 3.100) (Staatscourant, 2011).

Uit Tabel 3 volgt dat er sprake is van een statistisch significante afname van de geurconcentratie ( $p < 0,05$ ). Het gemiddelde geurverwijderingsrendement bedraagt 48% ( $n=7$ ;  $sd=11$ ). Ten opzichte van de in de Rgv gehanteerde waarde van 23 OU<sub>E</sub>/dierplaats/s betekent dit de emissie na de wasser 69% lager is.

### 3.4 Rendementsmetingen fijnstof

In Tabel 4 worden de resultaten weergegeven van de metingen van PM10 en PM2.5 aan Wasser 1. Opgemerkt dient te worden dat eenmaal een geplande rendementsmeting (7 september 2011) is geannuleerd omdat de wasser buiten werking was vanwege een storing.

**Tabel 4** Fijnstofmetingen aan een experimentele gecombineerde luchtwasser bij een vleesvarkenstal (Wasser 1; n.b. = niet bepaald)

Datum	PM10-in (mg/m <sup>3</sup> )	PM10-uit (mg/m <sup>3</sup> )	Rendement PM10 (%)	PM2.5-in (mg/m <sup>3</sup> ) <sup>(1)</sup>	PM2.5-uit (mg/m <sup>3</sup> ) <sup>(1)</sup>	Rendement PM2.5(%) <sup>(1)</sup>
14-jun-10	0,34	0,11	68	< 0,030	< 0,030	n.b.
18-okt-10	0,38	0,090	77	< 0,030	< 0,030	n.b.
20-dec-10	0,49	0,12	76	0,051	< 0,030	> 41
11-jul-11	0,23	0,10	59	< 0,030	< 0,030	n.b.
27-sep-11	0,21	0,060	72	< 0,030	< 0,030	n.b.
17-okt-11	0,32	0,10	71	< 0,030	< 0,030	n.b.
07-dec-11	0,45	0,17	63	< 0,030	< 0,030	n.b.

<sup>(1)</sup> Wanneer de PM2.5 concentratie van de ingaande en/of uitgaande lucht < 30 µg/m<sup>3</sup> bedraagt (detectielimiet), wordt geen waarde voor het rendement gerapporteerd. Wanneer de ingaande concentratie hoger is maar de uitgaande lager, wordt een minimumrendement gerapporteerd.

Uit Tabel 1 en 4 kan berekend worden dat de hoeveelheid PM10 die Wasser 1 ingaat gemiddeld 77 g/dierplaats/jaar en de emissie na de wasser gemiddeld 24 g/dierplaats/jaar bedraagt. De PM10-belasting van de wasser is dus een stuk lager dan de emissiewaarde van 153 g/dierplaats/jaar voor 'overige huisvestingssystemen' die is opgenomen in de lijst met "Emissiefactoren fijnstof voor veehouderij" die door het Ministerie van Infrastructuur en Milieu wordt gepubliceerd (IenM, 2012).

Uit Tabel 4 volgt dat er sprake is van een statistisch significante afname van de PM10-concentratie ( $p < 0,05$ ). Het gemiddelde PM10-verwijderingsrendement bedraagt 69% ( $n=7$ ;  $sd=6,4$ ). Ten opzichte van de in de "Emissiefactoren fijnstof voor veehouderij" gehanteerde waarde van 153 g/dierplaats/jaar betekent dit dat de emissie na de wasser 84% lager is.

Vanwege de lage concentraties konden de emissie en het verwijderingsrendement voor PM2.5 niet betrouwbaar worden vastgesteld.

### 3.5 Broeikasgasmetingen

In Tabel 5 worden de gemeten broeikasgasconcentraties (methaan, lachgas en kooldioxide) gegeven, zoals deze gemeten zijn aan Wasser 1.

**Tabel 5** Broeikasgasmetingen aan een experimentele gecombineerde luchtwasser bij een vleesvarkensstal (Wasser 1)

Datum	CH <sub>4</sub> -in (ppm)	CH <sub>4</sub> -uit (ppm)	N <sub>2</sub> O-in (ppm)	N <sub>2</sub> O-uit (ppm)	CO <sub>2</sub> -in (ppm)	CO <sub>2</sub> -uit (ppm)
14-jun-10	70	68	0.33	2.05	1.620	1.620
18-okt-10	159	156	0.56	6.22	2.210	2.260
20-dec-10	137	139	0.75	8.99	3.470	3.680
11-jul-11	104	121	0.28	1.67	1.210	1.300
27-sep-11	91	90	0.64	3.12	1.460	1.450
17-okt-11	98	99	0.65	4.29	1.750	1.750
07-dec-11	114	124	0.67	3.54	2.100	2.230

Uit Tabel 5 volgt dat er geen sprake is van een statistisch significante toe- of afname van de methaan- of kooldioxideconcentratie in de lucht die zich door de luchtwasser beweegt. Er is wel een duidelijke toename waarneembaar van de lachgasconcentratie. Lachgas is een broeikasgas dat 310 maal zo sterk is als CO<sub>2</sub>. De gemiddelde concentratie N<sub>2</sub>O-in en N<sub>2</sub>O-uit bedragen respectievelijk 0,55 en 4,3 ppm, hetgeen een verachtvoudiging van de concentratie betekent. In systemen waarin nitrificatie en/of denitrificatie plaatsvindt wordt meestal productie van lachgas waargenomen, zie bijv. Melse et al. 2011 en 2012. In het algemeen wordt bij biologische wassers zonder denitrificatie wel een lagere lachgastoename gevonden; dit wijst erop dat optredende denitrificatie de lachgasproductie verder doet toenemen. In paragraaf 3.9 wordt nader ingegaan op de werking van het nitrificatie/denitrificatie-systeem en wordt een stikstofbalans opgesteld.

### 3.6 Metingen temperatuur en relatieve vochtigheid

In Tabel 6 worden de overige luchtcondities (temperatuur en relatieve vochtigheid) van de lucht door Wasser 1 weergegeven.

**Tabel 6** Overige luchtcondities gemeten aan een experimentele gecombineerde luchtwasser bij een vleesvarkensstal (Wasser 1)

Datum	Temperatuur-in (°C)	Temperatuur-uit (°C)	Relatieve vochtigheid-in (%)	Relatieve vochtigheid-uit (%)
14-jun-10	25,0	18,8	54,4	> 95
18-okt-10	22,1	17,7	64,8	> 95
20-dec-10	19,3	16,2	71,2	> 95
11-jul-11	26,1	20,2	53,6	> 95
27-sep-11	24,8	20,9	71,9	> 95
17-okt-11	23,6	19,4	68,7	> 95
07-dec-11	21,5	17,6	64,6	> 95

Uit Tabel 6 blijkt dat de wasser er goed in slaagt om de lucht te bevochtigen (de uitgaande lucht heeft een relatieve vochtigheid van > 95%), hetgeen er op wijst dat er een goed contact is tussen de luchtfase en de waterfase. Vanwege de optredende adiabatische verdamping is de uitgaande lucht gemiddeld ca. 5°C lager dan de ingaande lucht.

### 3.7 Analyses water

In Tabel 7, 8 en 9 worden de analyses van de watermonsters weergegeven.

Tabel 7 betreft de monsters die uit het waswaterbassin zijn genomen, dat wil zeggen het water dat continu over het luchtwasppakket wordt gerecirculeerd. Dit is dezelfde waterstroom als de EC-gestuurde spuistroom (zie Figuur 1).

**Tabel 7** Watermonsters van een experimentele gecombineerde luchtwasser bij een vleesvarkensstal - waswaterbassin

Datum	Ammonium-N (g N/kg)	Nitriet-N (g N/kg)	Nitraat-N (g N/kg)	Totaal-N (g N/kg)	Droge stof (g/kg)	As (g/kg)	pH (-)	EC (mS/cm)
14-jun-10	2,52	1,15	1,18	4,96	4,21	2,41	7,3	24,2
18-okt-10	1,82	1,54	0,020	3,45	8,93	4,48	8,5	17,9
20-dec-10	1,85	0,89	0,61	3,65	2,14	1,31	7,5	17,4
11-jul-11	1,61	0,96	0,031	3,02	5,82	3,58	8,6	16,8
27-sep-11	1,57	1,14	0,016	3,02	3,08	1,75	7,5	15,8
17-okt-11	1,85	1,31	0,014	3,46	2,90	1,65	7,6	17,9
07-dec-11	1,72	1,21	0,012	3,39	2,55	1,37	7,8	17,6

Uit Tabel 7 volgt dat de pH (met een gemiddelde waarde van 7,8) wat aan de hoge kant is; normaliter bevindt de pH van het waswater van een biologische luchtwasser zich tussen 6,5 en 7,5. Uit de gehalten nitraat en nitriet blijkt verder dat er onvolledige nitrificatie optreedt in de wasser, dat wil zeggen dat er sprake is van ophoping van nitriet. Het N-totaal gehalte bedraagt gemiddeld 3,6 g N/liter en de EC gemiddeld 18 mS/cm. Desondanks is de ammoniakverwijdering (zie Tabel 2) goed, waaruit geconcludeerd wordt dat remming door nitriet geen (grote) rol speelt en de wasser goed functioneert.

Tabel 8 betreft de monsters die genomen zijn van waswater dat van de denitrificatie-unit wordt teruggevoerd naar het waswaterbassin. Dit is dezelfde waterstroom als de pH-gestuurde spuistroom (zie Figuur 1).

**Tabel 8** Watermonsters van een experimentele gecombineerde luchtwasser bij een vleesvarkensstal - effluent denitrificatie (n.b. = niet bepaald)

Datum	Ammonium-N (g N/kg)	Nitriet-N (g N/kg)	Nitraat-N (g N/kg)	Totaal-N (g N/kg)	Droge stof (g/kg)	As (g/kg)	pH (-)	EC (mS/cm)
14-jun-10	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
18-okt-10	1,71	0,41	0,018	2,30	9,87	4,65	9,3	13,6
20-dec-10	1,78	1,08	0,093	3,05	2,45	1,44	8,9	15,2
11-jul-11	1,71	< 0,010	< 0,010	1,90	6,80	3,94	8,8	14,4
27-sep-11	1,60	0,10	< 0,010	1,78	4,83	2,32	9,4	11,3
17-okt-11	1,70	0,14	< 0,010	1,81	3,93	1,86	9,5	11,2
07-dec-11	1,75	0,021	< 0,010	1,86	4,18	1,81	9,3	12,3

Uit Tabel 8 volgt dat het nitrietgehalte (en daarmee het totaal-N gehalte) beduidend lager is dan in het waswaterbassin (Tabel 7). Dit wijst erop dat er inderdaad stikstof wordt verwijderd middels denitrificatie. Aangezien het water in het waswaterbassin nauwelijks nitraat bevat, lijkt er rechtstreekse omzetting van nitriet naar N<sub>2</sub> plaats te vinden, zonder dat het nitriet eerst naar nitraat is omgezet. Het is bekend dat een dergelijke omzetting kan plaatsvinden door bepaalde bacteriën (Anammox, anaerobe ammonium oxidatie). Een andere verklaring zou kunnen zijn dat de omzetting van nitraat naar N<sub>2</sub> zo snel plaatsvindt, dat geen nitraat wordt waargenomen in het water. De pH van het water is (met een gemiddelde waarde van 9,0) hoger dan de pH van het water in het waswaterbassin, hetgeen verklaard kan worden door de H<sup>+</sup> consumptie (oftewel OH<sup>-</sup> productie) tijdens de denitrificatie.

Tabel 9 betreft de monsters die genomen zijn van het spuiwater dat de denitrificatie-unit na bezinking verlaat; dit is de tijdgestuurde spuistroom (zie Figuur 1).

**Tabel 9** Watermonsters van een experimentele gecombineerde luchtwasser bij een vleesvarkensstal - spuiwater (n.b. = niet bepaald)

Datum	Ammonium-N (g N/kg)	Nitriet-N (g N/kg)	Nitraat-N (g N/kg)	Totaal-N (g N/kg)	Droge stof (g/kg)	As (g/kg)	pH (-)	EC (mS/cm)
14-jun-10	2,31	1,98	0,035	4,26	5,69	3,41	8,9	21,6
18-okt-10	1,87	1,53	0,023	3,45	6,32	3,19	8,2	18,3
20-dec-10	1,85	0,53	0,983	3,63	2,31	1,41	7,3	17,3
11-jul-11	1,73	< 0,010	< 0,010	2,07	12,1	8,08	8,7	14,7
27-sep-11	1,43	0,069	< 0,010	1,84	10,2	4,40	9,5	11,0
17-okt-11	1,70	0,14	< 0,010	2,06	11,3	5,51	9,6	11,2
07-dec-11	1,72	1,17	0,013	3,43	2,59	1,46	7,7	17,6

De gemiddelde gehalten van het water zijn iets hoger dan het effluent van de denitrificatie voor bezinking (Tabel 8); dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de aanwezigheid van de bezinktank.

### 3.8 Metingen waterverbruik, elektraverbruik en spuiwaterproductie

De metingen zijn uitgevoerd aan een luchtwasinstallatie die gedimensioneerd is voor een stal met 2.600 vleesvarkens en heeft een maximaal ventilatiedebiet van 160.000 m<sup>3</sup>/uur.

Het waterverbruik van de luchtwasser bedroeg gemiddeld over de meetperiode 7,0 m<sup>3</sup>/dag. Ongeveer 32% hiervan (2,2 m<sup>3</sup>/dag) is afgevoerd als spuiwater (zie onder), waardoor 4,7 m<sup>3</sup>/dag resteert die de luchtwasser verlaat met de bevochtigde luchtstroom.

Het elektraverbruik van de luchtwasser bedroeg gemiddeld over de meetperiode 3,3 kW, oftewel 78 kWh per dag (71 kWh/dag voor de recirculatiepompen en 7 kWh/dag voor de denitrificatie-unit).

De spuiwaterproductie van de luchtwasser bedroeg gemiddeld over de meetperiode 2,2 m<sup>3</sup>/dag, oftewel 93 liter/uur. Deze spuiwaterhoeveelheid is 60% lager dan de 224 liter/uur die aan het eerdere prototype was gemeten voordat de denitrificatie-unit werd vergroot (zie Melse et al., 2011). Het grootste deel van het water werd gespuid op basis van de geleidbaarheidsregeling (ca. 76 liter/uur) en een kleiner deel op basis van de tijdsregeling (ca. 12 liter/uur), respectievelijk de pH regeling (ca. 5 liter/uur).

Het totale spuidebiet van omgerekend 0,036 liter/uur/dierplaats is beduidend lager dan de hoeveelheid die verwacht mag worden voor een 'normale' biologische luchtwasser waarbij geen denitrificatie plaatsvindt. Wanneer uitgegaan wordt van een belasting van 4,3 kg NH<sub>3</sub>/dierplaats/jaar, zoals gevonden is in onderliggend onderzoek (zie Tabel 1 en 2), een ammoniakverwijderingsrendement van 85% en een spuiwaterconcentratie van maximaal 3,2 g totaal-N/liter (hetgeen gangbaar is voor een biologische luchtwasser), zou een wasser zonder denitrificatie een spuidebiet hebben van 0,11 liter/uur/dierplaats. Het denitrificatiesysteem heeft dus tot gevolg dat het spuiwaterdebiet wordt teruggebracht met een factor 3.

### 3.9 Stikstofbalans en werking denitrificatie

Op basis van de gemeten lucht- en spuidebieten en de stikstofmetingen die zijn uitgevoerd aan de luchtwasser en de stal is een stikstofbalans opgesteld over het luchtwassysteem. Deze balans wordt in Figuur 5 weergegeven. De balans is op jaarbasis en gebaseerd op 2600 vleesvarkens.

#### Lucht

De ingaande hoeveelheid NH<sub>3</sub>-N is berekend door voor elke 24-uursmeting het gemeten gemiddelde debiet (Tabel 1) te vermenigvuldigen met de gemiddelde ingaande ammoniakconcentratie (Tabel 2). Dit is berekend voor elke van de zeven metingen en hiervan is weer het gemiddelde berekend. Aangezien de metingen waren uitgevoerd aan slechts één van de twee wassers (elke wasser behandeld de helft van de totale ventilatielucht van de stal), zijn de uitkomsten vermenigvuldigd met twee om een ammoniakvracht op basis van de volledige stal (2600 vleesvarkens) te kunnen rapporteren.



De gemiddelde uitgaande hoeveelheid NH<sub>3</sub>-N en de gemiddelde N<sub>2</sub>O-N productie in de luchtwasser zijn op een vergelijkbare wijze berekend.

*Water*

Voor de drie verschillende spuistromen is voor elke spuiroom de gemiddelde stikstofvracht berekend door de gemiddelde N-totaal concentratie te nemen (Tabel 7, 8 en 9) en deze te vermenigvuldigen met de respectievelijke gemiddelde spuidebieten (paragraaf 3.8). Vervolgens is de totale ammoniakvracht berekend door de drie spuistromen bij elkaar op te tellen.

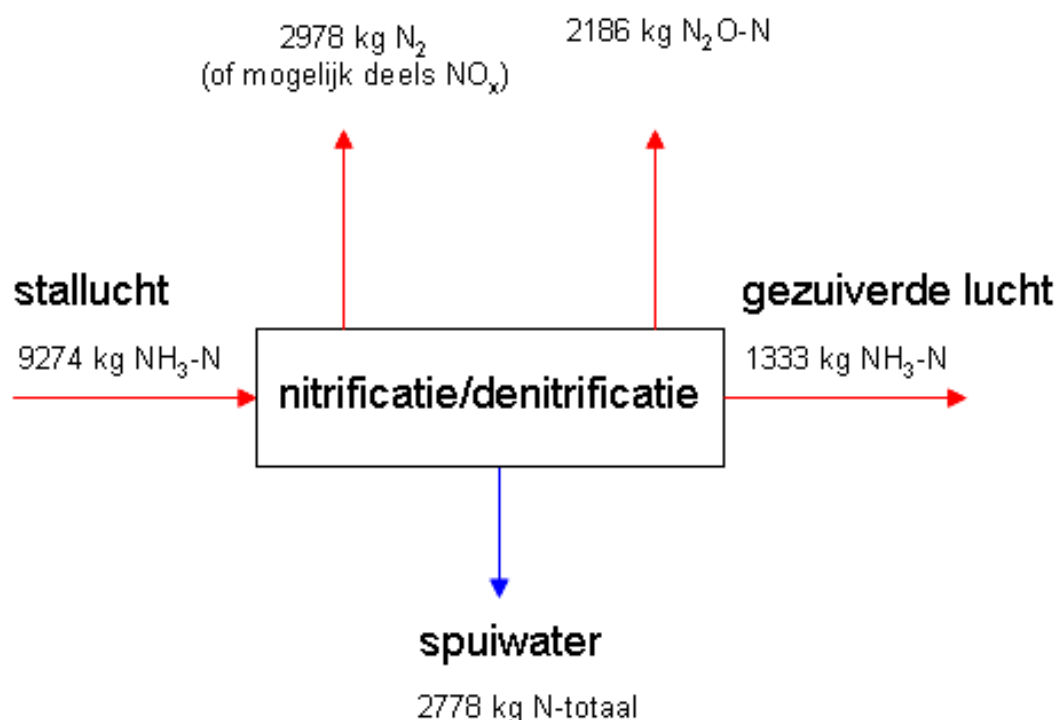
*Werking denitrificatie en meetfouten*

Wanneer de aldus berekende stikstofvrachten in een balans worden weergegeven (Figuur 5), blijkt dat er beduidend meer stikstof wordt aangevoerd in de vorm van NH<sub>3</sub>, dan dat er wordt afgevoerd met het spuiwater (als ammonium, nitriet en nitraat ) of met de lucht (als NH<sub>3</sub> en N<sub>2</sub>O).

Wel moet bedacht worden dat meetfouten (zowel in concentraties als debieten) afwijkingen kunnen veroorzaken in de berekende stikstofvrachten. Uit eerder onderzoek (Estellés et al., 2011, 2012) volgt dat een stikstofbalans die op een dergelijke manier wordt opgesteld een onzekerheid kent van ca. 10%, dat wil zeggen dat pas geconcludeerd kan worden dat er denitrificatie (in dit geval N<sub>2</sub> productie) optreedt, wanneer de afwijking van de balans groter is dan ca. 10% van de totale ingaande NH<sub>3</sub>-N hoeveelheid.

In het geval van Figuur 5, is er sprake van een afwijking in de balans van 2978 kg / 9274 kg = 32%. In principe is het mogelijk dat enige NO<sub>x</sub> productie plaatsvindt, maar er zijn geen aanwijzingen dat dit een belangrijke rol speelt.

De conclusie is dan ook dat denitrificatie (productie van N<sub>2</sub>) een belangrijke rol speelt in het verwijderen van stikstof uit het onderzochte luchtwassersysteem. Dit gaat gepaard met de productie van een hoeveelheid lachgas; mogelijk zou de lachgasproductie verminderd kunnen worden door optimalisatie van het stikstofverwijderingsproces. Uit Figuur 5 volgt dat gemiddeld 24% van de ingaande ammoniak wordt omgezet in lachgas (berekend als 2186 / 9274 x 100%).



**Fig. 5** Massabalans op jaarbasis voor stikstofverwijdering door een experimentele biologische luchtwasser met denitrificatie (2600 vleesvarkensplaatsen); de N<sub>2</sub> productie is niet gemeten maar berekend als het verschil tussen de andere posten.

## 4 Conclusies en aanbevelingen

Tijdens de metingen aan het biologische luchtwassersysteem met denitrificatie werd voor de verwijdering van ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) een gemiddeld rendement van 85% ( $n=7$ ;  $sd=16$ ) gevonden. Voor de verwijdering van geur werd een gemiddeld rendement van 48% ( $n=7$ ;  $sd=11$ ) gevonden. Tenslotte werd voor de verwijdering van fijnstof ( $\text{PM}_{10}$ ) een gemiddeld rendement van 69% ( $n=7$ ;  $sd=6,4$ ) gevonden. De gemiddelde luchtverblijftijd in het pakkingsmateriaal van de luchtwasser bedroeg 3,6 seconden. De concentraties van  $\text{CH}_4$  en  $\text{CO}_2$  in de lucht bleven ongewijzigd. De concentratie van  $\text{N}_2\text{O}$  in de lucht nam toe van gemiddeld 0,55 ppm naar 4,3 ppm.

Op basis van de metingen van ammoniak, lachgas en stikstofgehalten in het waswater is tenslotte een massabalans opgesteld voor de verwijdering van stikstof uit het systeem. Daaruit wordt geconcludeerd dat waarschijnlijk ca. 56% van de aangeboden  $\text{NH}_3\text{-N}$  wordt gedenitrificeerd, dat wil zeggen dat dit deel van de stikstof het luchtwassysteem uiteindelijk via de lucht verlaat als  $\text{N}_2$  en  $\text{N}_2\text{O}$  en mogelijk enig  $\text{NO}_x$ . Uit de metingen volgt verder dat gemiddeld 24% van de aangeboden  $\text{NH}_3\text{-N}$  wordt omgezet in  $\text{N}_2\text{O}$ . De overige stikstof wordt afgevoerd via het spuiwater (ammonium, nitriet en nitraat) en als in de lucht resterende  $\text{NH}_3$ , aangezien het ammoniakverwijderingsrendement lager is dan 100%.

Als gevolg van de toepassing van het denitrificatiesysteem kon het spuiwaterdebiet met een factor 3 gereduceerd worden ten opzichte van een biologische luchtwasser zonder denitrificatie. Het stikstofgehalte van het spuiwater bedroeg gemiddeld 3,4 g/liter.

Geconcludeerd kan worden dat de aanpassingen die zijn gedaan aan het luchtwassysteem tot gevolg hebben gehad dat er sprake is een grote afname van het spuidebiet in vergelijking met een biologische luchtwasser zonder denitrificatiesysteem. Een bijkomend effect van het nitrificatie/denitrificatie systeem is echter dat een aanzienlijke hoeveelheid lachgas werd geproduceerd. Aanbevolen wordt om nader onderzoek te doen naar de manier waarop de productie van lachgas kan worden verlaagd.

## Referenties

- CEN. 2003. Air quality: Determination of odour concentration by dynamic olfactometry (EN 13725). Brussels, Belgium: European Committee for Standardization.
- Estellés, F.; S. Calvet; R.W. Melse; N.W.M. Ogink. 2012. Uncertainty Modelling to Evaluate Nitrogen Balances As a Tool to Determine N<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O Formation in Ammonia Bioscrubbers. Environmental Engineering Science. *In press*.
- Estellés, F.; R.W. Melse; N.W.M. Ogink. 2011. Analysis of reactive nitrogen (Nr) balances as a tool for assessing the performance of air scrubbers at livestock facilities. Report 376. Wageningen UR Livestock Research, Lelystad.
- Groenestein, C.M.; J. Mosquera; N.W.M. Ogink. 2011. Protocol voor meting van methaanemissie uit huisvestingssystemen in de veehouderij. Rapport 493. Wageningen UR Livestock Research, Lelystad.
- Hofschreuder, P.; A.J.A. Aarnink; Y. Zhao; N.W.M. Ogink. 2007. Measurement protocol for determining fine dust emission factors of animal housing systems. In: DustConf 2007, How to improve air quality. International Conference, 23-24 April, Maastricht, The Netherlands.
- IenM. 2012. Emissiefactoren fijnstof voor veehouderij. Web: <http://www.rijksoverheid.nl/documenten-en-publicaties/verslagen/2012/04/18/emissiefactoren-fijn-stof-voor-veehouderij-open-standaard.html>
- Melse, R.W.; J.M.G. Hol; J. Mosquera; G.M. Nijeboer; J.W.H. Huis in 't Veld; T.G. van Hattum; R.K. Kwikkell; F. Dousma; N.W.M. Ogink. 2011. Monitoringsprogramma experimentele gecombineerde luchtwassers op veehouderijbedrijven. Rapport 380. Wageningen UR Livestock Research, Lelystad.
- Melse, R.W.; T.G. van Hattum; J.W.H. Huis in't Veld; F.A. Gerrits. 2012. Metingen aan twee luchtwassersystemen in een vleeskuikenstal met conditionering van ingaande ventilatielucht. Rapport 503. Wageningen UR Livestock Research, Lelystad.
- Mosquera, J.; C.M. Groenestein, N.W.M. Ogink. 2011. Protocol voor meting van lachgasemissie uit huisvestingssystemen in de veehouderij. Rapport 494. Wageningen UR Livestock Research, Lelystad.
- NEN-EN 12341. 1998. Luchtkwaliteit - bepaling van de PM10 fractie van zwevend stof - referentiemethode en veldonderzoek om de referentiegelijkwaardigheid aan te tonen van meetmethoden., Nederlands Normalisatie-instituut, Delft.
- NEN-EN 14907. 2005. Ambient air quality - standard gravimetric measurement method for the determination of the pm2,5 mass fraction of suspended particulate matter. Nederlands Normalisatie-instituut, Delft.
- Ogink, N.W.M.; J. Mosquera; J.M.G. Hol. 2011a. Protocol voor meting van ammoniakemissie uit huisvestingssystemen in de veehouderij 2010. Rapport 454. Wageningen UR Livestock Research, Lelystad.
- Ogink, N.W.M.; P. Hofschreuder; A.J.A. Aarnink. 2011b. Protocol voor meting van fijnstofemissie uit huisvestingssystemen in de veehouderij 2010. Rapport 492. Wageningen UR Livestock Research, Lelystad.
- Ogink, N.W.M. 2011. Protocol voor meting van geuremissie uit huisvestingssystemen in de veehouderij. Rapport 491. Wageningen UR Livestock Research, Lelystad.
- Pedersen, S.; V. Blanes-Vidal; H. Joergensen; A. Chwalibog; A. Haeussermann; M.J.W. Heetkamp; A.J.A. Aarnink. 2008. Carbon Dioxide Production in Animal Houses: A literature Review". Agricultural Engineering International: CIGR Ejournal. Manuscript BC 08 008, Vol. X. December, 2008.
- Staatscourant. 2012. Regeling ammoniak en veehouderij. Staatscourant 24 oktober 2012, nr. 21301, Sdu, Den Haag.
- Staatscourant. 2011. Regeling geurhinder en veehouderij. Staatscourant 18 oktober 2011, nr. 18729, Sdu, Den Haag.
- Wintjens, Y. 1993. Gaswasfles. In Meetmethoden NH<sub>3</sub>-emissie uit stallen. Onderzoek inzake de mest- en ammoniak- problematiek in de veehouderij 16 (eds E.N.J. van Ouwkerk), pp. 38-40. DLO, Wageningen.

## Bijlage: Meetmethoden

### 1 Meetmethode fijnstof

#### Algemeen

De bepaling van de concentratie fijnstof werd uitgevoerd door een bekende hoeveelheid lucht met een vaste lichtsnelheid door specifieke monsternamekoppen te zuigen gedurende 24 uur. In de monsternamekoppen bevonden zich voorafscieder om de grotere stofdeeltjes te scheiden van de gevraagde stoffracties (PM10 of PM 2,5). Voor beide stoffracties werd een cycloon gebruikt als voorafscieder, omdat impactoren minder geschikt bij hoge stofconcentraties, zoals in uitgaande stallucht regelmatig het geval is (Hofschreuder et al. (2007).

De uitvoering van de luchtinlaat was gelijk aan de uitvoering zoals die in de normen voor stofmetingen in buitenlucht beschreven is voor toepassing van een impactor, alleen is het impactiegedeelte vervangen door de cycloon. De precieze uitvoering van deze monsternamekoppen wordt beschreven in het rapport van Hofschreuder *et al.* (2007). Het stof dat na voorafscieiding uiteindelijk overbleef werd op een filter verzameld. Het filter werd voorafgaand aan en na de monstername onder geconditioneerde omstandigheden gewogen. De wegingen zijn uitgevoerd volgens de gehanteerde normen voor de buitenlucht (NEN-EN 12341, 1998; NEN-EN 14907, 2005).

#### Pompen

Voor de metingen werd gebruik gemaakt van pompen van het type Charlie HV (roterend 6 m<sup>3</sup>/h; Ravebo Supply B.V., Brielle) monsternamepomp. Deze 'constant flow' pompen regelen het debiet automatisch in op basis van de gemeten temperatuur bij de monsternamekop. Het debiet van deze pompen blijft ook constant bij toename van de drukval over het filter. Hierdoor werd een stabiele luchtstroom verkregen binnen 2% van de nominale waarde. De pompen werden geprogrammeerd op start en einde van de monsternameperiode. De hoeveelheid lucht die bij de monsternamepunten werd aangezogen werd met een gasmeter gemeten en omgerekend naar standaard condities (1 atm., 0°C).

#### Cycloon-voorafscieder

Voor de bepaling van de PM10 en/of PM2.5 concentratie van de lucht voor en na de wasser werd gebruik gemaakt van een cycloon voorafscieder. Het voordeel van de cycloon voorafscieder is dat het hoge stofconcentraties betrouwbaar kan meten. Het afscheidingssysteem vangt de grotere stofdeeltjes op in een beker. Hierin kunnen grote hoeveelheden stof worden opgeslagen. Figuur B1 laat de gebruikte cyclonen zien. Het luchtdebiet door de monsternamekop met cycloon was 1,0 m<sup>3</sup>/uur.

**Figuur B1** Links de complete meetset met twee verschillende cyclonen (langwerpig is voor PM10) en de filterhouder en rechts de binnenkant van de luchtinlaat deze is voor beide stoffracties gelijk



#### Filter

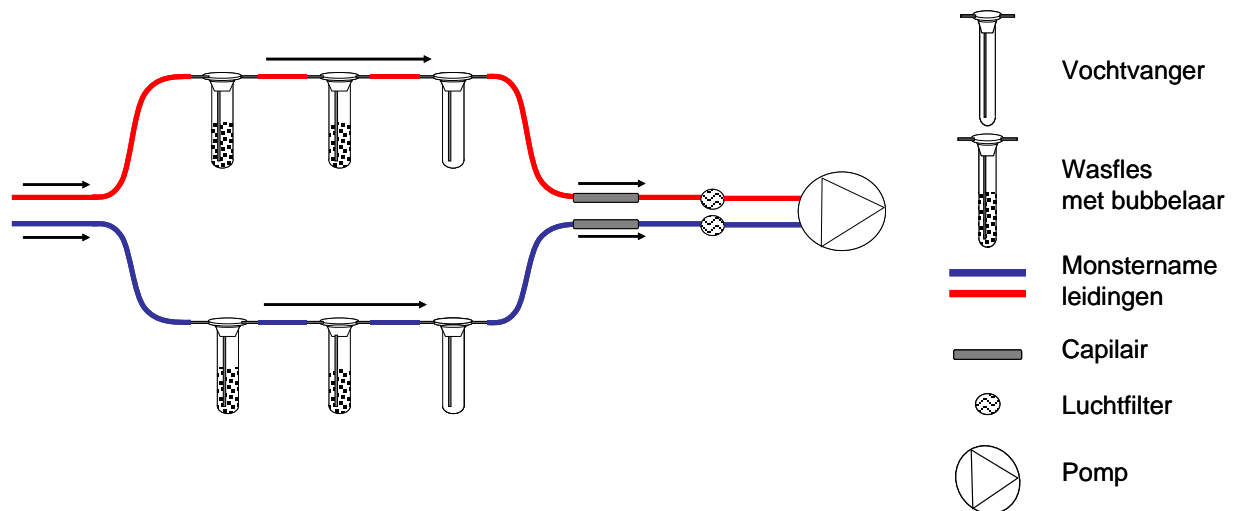
Het stof werd verzameld op glasvezelfilters met een doorsnee van 47 mm. De filters werden voor en na de metingen gewogen onder standaard condities: temperatuur 20°C ± 1°C en 50% ± 1% relatieve

luchtvochtigheid. Deze voorwaarden staan beschreven in NEN-EN 14907 (2005). Het verschil in gewicht voor en na de metingen werd gebruikt om de hoeveelheid verzameld stof te bepalen.

## 2 Meetmethode ammoniak

De ammoniakconcentratie werd volgens de natchemische meetmethode voor  $\text{NH}_3$  (Wintjes, 1993) gemeten. Bij deze meetmethode wordt de lucht via een monsternameleiding met een constante luchtstroom aangezogen met behulp van een pomp met capillair. Alle lucht wordt via een vochtvanger door een impinger (geplaatst in een wasfles met zuur) geleid, waarbij de  $\text{NH}_3$  wordt opgevangen. Om rekening mee te houden met eventuele doorslag wordt een tweede fles in serie geplaatst. De metingen worden per meetplek in duplo uitgevoerd (Figuur B2). De molariteit van de zure oplossing in de wasflessen is afhankelijk van het aanbod van  $\text{NH}_3$  dat moet worden gebonden. Na de bemonsteringstijd (24 uur) wordt de hoeveelheid gebonden  $\text{NH}_3$  spectrofotometrisch bepaald. Door de bemonsteringsduur, de bemonsteringsflow, het  $\text{NH}_4^+$  gehalte en de hoeveelheid opvangvloeistof te verrekenen kan de  $\text{NH}_3$ -concentratie in de bemonsterde lucht worden bepaald. Voordeel van deze meetmethode is dat het onder alle omstandigheden de juiste bepaling geeft. Vooral bij zeer vochtige omstandigheden biedt de methode uitkomst. Nadeel is dat alleen een verzamelmonster kan worden genomen en geen informatie beschikbaar komt over het verloop van de  $\text{NH}_3$ -concentratie gedurende de bemonsteringsperiode.

**Figuur B2** Meetopstelling natchemisch methode voor ammoniakemissiemetingen



De volgende punten worden op een waarnemingsformulier genoteerd.

- codering van de wasflessen per meetlocatie
- gemeten flow per capillair (start en einde meting)
- start en eindtijd van de metingen
- $\text{NH}_3$ -concentratie (indicatie) van de ingaande lucht m.b.v. Kitagawa gasdetectiebuisje

Door de analist worden in het laboratorium de volgende resultaten genoteerd:

- start en eindgewicht van alle wasflessen (inclusief vochtvanger)
- de hoeveelheid ingevangen  $\text{NH}_4^+$  per wasfles (inclusief vochtvanger wanneer hier vocht in zit) d.m.v. spectrofotometrische bepaling
- aanwezigheid van sulfaat (ja/nee), hetgeen bij een chemische wasser aangeeft dat er doorslag van waswater plaats heeft gevonden tijdens de meting

### 3 Meetmethode geur

Het geurmonster werd tussen 10:00 en 12:00 uur aangezogen door een pomp bij de meetapparatuur. De bemonstering werd uitgevoerd volgens de zogenaamde longmethode (Ogink en Mol, 2002). Hierbij werd een leeg teflon monsterzak, die zich in een gesloten vat bevond, via een teflon slang gevuld met te bemonsteren lucht. Door lucht uit het vat te zuigen ( $0,5 \text{ l min}^{-1}$ ), ontstond in het vat onderdruk en werd door een stoffilter ( $1-2 \mu\text{m}$ ) stallucht aangezogen in de zak. Om condensvorming te voorkomen werd verwarmingslint langs de monsternamleiding aangebracht.

Het monster werd direct na bemonstering naar het geurlaboratorium van Wageningen UR Livestock Research vervoerd om binnen 30 uur te worden geanalyseerd. De geuranalyses werden in duplo uitgevoerd door het geurlaboratorium van Wageningen UR Livestock Research volgens de Europese norm EN 13725 (CEN, 2003). Het geurlaboratorium van Wageningen UR Livestock Research is onder nummer L313 geaccrediteerd door de Raad voor Accreditatie te Utrecht voor het uitvoeren van geuranalyses. Aan de geuranalyses werd deelgenomen door een groep van 4 tot 6 panelleden inwisselende samenstelling. De gevoeligheid van de panelleden werd voor de metingen getest met butanol. De geurconcentraties worden vermeld in  $\text{OU}_E \text{ m}^{-3}$ . De eenheid ' $\text{OU}_E$ ' staat hierbij voor 'European Odour Units'. Deze aan de EN 13725 ontleende terminologie sluit aan bij de internationale literatuur op dit vakgebied.

### 4 Meetmethode broeikasgassen (lachgas, methaan en kooldioxide)

Op dezelfde wijze waarop een geurmonster wordt genomen (zie de longmethode die hierboven beschreven wordt) wordt ook een monsterzak gevuld voor de analyse van broeikasgassen (methaan en lachgas) en kooldioxide. De monsterzak wordt gevuld in 24 uur in combinatie met discontinue bemonstering, d.w.z. met behulp van een tijdsklok wordt elk uur gedurende 5 minuten lucht bemonsterd en gedurende 55 minuten niet bemonsterd. Op deze wijze wordt een tijdsgemiddeld monster verkregen. Het gehalte aan broeikasgassen in het monster wordt bepaald op een gaschromatograaf (Interscience/Carbo Erba Instruments, GC 8000 Top; kolom: Molsieve 5A ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ), Haysep Q ( $\text{N}_2\text{O}$ ); detector:  $\text{CH}_4$ : FID,  $\text{N}_2\text{O}$ : ECD,  $\text{CO}_2$ : HWD).

### 5 Aanvullende metingen

De temperatuur ( $^{\circ}\text{C}$ ) en de relatieve luchtvochtigheid (%) werden tijdens de meting continu gemeten gedurende alle meetperioden met temperatuur- en vochtsensoren (Rotronic Hygromer®). De nauwkeurigheid van deze sensoren was resp.  $\pm 1,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$  en  $\pm 2 \%$ . Eén sensor werd in de ingaande luchtstroom van de wasser gehangen, een tweede sensor in de uitgaande luchtstroom van de wasser. De sensor voor de buitenlucht was in de schaduw geplaatst. De sensoren werden vóór en na alle metingen gecontroleerd. In Tabel B3 wordt een overzicht gegeven van de aanvullende metingen.

**Tabel B3** Overzicht van de aanvullende metingen

	Frequentie	Methode
Temperatuur ( $^{\circ}\text{C}$ )	Continu gedurende 24 uur, voor en na de wasser	Rotronic met datalogger
Relatieve luchtvochtigheid (%)	Continu gedurende 24 uur, alleen vóór de wasser	Rotronic met datalogger
Ventilatie-debiet door wasser ( $\text{m}^3/\text{uur}$ )	Continu gedurende 24 uur	Indien mogelijk met meetventilator, in alle andere gevallen met behulp van $\text{CO}_2$ -balans methode (Pedersen et al., 2008)

## 6 Berekening emissiereductie (rendement)

Het verwijderingsrendement van de wassers (bijv. voor geur of voor ammoniak) werd berekend door de concentratie van de betreffende component in de behandelde lucht ( $C_{\text{uitgaand}}$ ) te vergelijken met de concentratie van de betreffende component in de ingaande lucht van de wasser ( $C_{\text{ingaaand}}$ ). Hierbij werd de volgende formule gebruikt:

$$\text{Verwijderingsrendement} = \frac{C_{\text{ingaaand}} - C_{\text{uitgaand}}}{C_{\text{ingaaand}}} \times 100\%$$

Middels de Student-t-toets werd nagegaan of het gevonden gemiddelde rendement significant afweek van 0 ( $p < 0,05$ ).



Wageningen UR Livestock Research

Edelhertweg 15, 8219 PH Lelystad T 0320 238238 F 0320 238050

E [info.livestockresearch@wur.nl](mailto:info.livestockresearch@wur.nl) | [www.livestockresearch.wur.nl](http://www.livestockresearch.wur.nl)