

Oriënterende ammoniak- en methaanmetingen in de Kwatrijnstal

Joachim Deru
Arjan Hensen
Daniëlle van Dinther
Arnoud Frumau
Pim van den Bulk
Henk Antonissen

*Onderzoek van het
Louis Bolk Instituut i.s.m.*

TNO innovation
for life



© Juli 2018 Louis Bolk Instituut

Oriënterende ammoniak- en methaanmetingen
in de Kwatrijnstal

Ir. Joachim Deru¹, dr. Arjan Hensen², dr. Daniëlle
van Dinther², drs. Arnoud Frumau², ing. Pim van
den Bulk², ing. Henk Antonissen³

¹Louis Bolk Instituut ²TNO ³Antonissen Agrarisch Advies

Juli 2018

Publicatienummer 2018-021 LbD

29 pagina's

www.louisbolk.nl

info@louisbolk.nl

T 0343 523 860

Kosterijland 3-5

3981 AJ Bunnik

 @LouisBolk

Louis Bolk Instituut: onafhankelijk, internationaal kennisinstituut
ter bevordering van duurzame landbouw, voeding en gezondheid

Voorwoord

Het nieuwe beleid van de Provincie Noord-Brabant om onder andere in rundveestallen de ammoniakemissie met ingang van 2022 stevig terug te brengen heeft grote impact op de melkveehouderijpraktijk. Op aanvraag van de Provincie Noord-Brabant heeft het Louis Bolk Instituut, in samenwerking met TNO (voorheen ECN) en Antonissen Agrarisch Advies, oriënterende ammoniakemissiemetingen uitgevoerd in de Kwatrijnstal bij Kaatsheuvel. Het Kwatrijnhouderijsysteem is uniek omdat door een gescheiden opvang en opslag van de vaste mest en de gier, ammoniakemissie wordt beperkt. Bovendien is het een totaalconcept met ook dierenwelzijn, energie en biodiversiteit als speerpunten. De Provincie Noord-Brabant (Theo van de Ven, Jos van Lent, Paul van Enckevoort en gedeputeerde Anne-Marie Spierings) heeft op voorspraak van Stichting Duinboeren het onderzoek gefaciliteerd, dit in het kader van de zogenaamde 'ondersteunende maatregelen'. De Provincie Noord-Brabant ondersteunt hiermee 'begin-of-pipe' oplossingen waarbij de emissies van ammoniak en broeikasgassen aan het begin van de cyclus worden aangepakt.

Provincie Noord-Brabant



Dank aan Sjaak en Suzanne Sprangers en aan Dorus van Loon voor de medewerking en het beschikbaar stellen van hun stallen tijdens de meetdagen. Ook is dank verschuldigd aan Nico Ogink (Wageningen University & Research-LR) voor het sparren over een juiste weergave van de meetresultaten in dit specifieke geval.

De auteurs,
Juli 2018

Inhoud

Samenvatting	6
1 Inleiding	7
2 Materiaal en methoden	8
2.1 Stallen	8
2.2 Mestanalyses	9
2.3 Emissiemetingen	10
2.4 Vergelijking met RAV-waardes	15
3 Resultaten	16
3.1 Windtunnelmetingen (simulatie van mest uitrijden)	16
3.2 Boxmetingen	17
3.3 Pluimmetingen	20
3.4 Mini-DOAS	23
4 Discussie en conclusies	26
4.1 Ammoniakemissies van de stal	26
4.2 Mogelijkheden voor verdere beperking van de ammoniakemissie van de Kwatrijnstal	27
4.3 Ammoniakemissie bij uitrijden	27
Referenties	29

Samenvatting

Bij de Kwatrijnstal in Kaatsheuvel werden in januari en februari 2018 oriënterende metingen uitgevoerd voor de emissie van ammoniak en methaan. De pluimmetingen zijn uitgevoerd op één meetmoment, en de open-padmetingen (mini-DOAS) zijn continu uitgevoerd gedurende 7 weken. De resultaten zijn in dit rapport omgerekend naar emissie per dier per jaar om vergelijking met de RAV-normen te faciliteren; echter: **de resultaten van dit rapport kunnen daarmee niet gebruikt worden om een emissiefactor voor deze stal of dit staltype vast te stellen**. Daarvoor zijn metingen op meerdere dagen verspreid over het jaar bij meerdere uitvoeringen van het staltype nodig zoals dat in een RAV-procedure wordt gedaan.

Met pluimmetingen is een totaalschatting van de ammoniakemissie van de Kwatrijnstal gemaakt. Omgerekend komen we daarmee op een emissie van $6 \pm 0,8$ kg NH₃/dier/jaar. Hierbij is het aantal aanwezige dieren > 2 jaar genomen. Op dezelfde dag zijn metingen uitgevoerd aan een nabijgelegen stal met een vergelijkbaar aantal dieren maar een conventionele roostervloer. In deze referentiestal werd een emissie van $11 \pm 1,2$ kg NH₃/dier/jaar uit de metingen berekend. Omdat in de Kwatrijnstal veel kleinere Jerseykoeien gehuisvest zijn dan in de referentiestal (HF koeien), is voor een betere vergelijking de emissie ook berekend per kg vet en eiwit gecorrigeerde melk (FPCM). We komen uit op 0,9 g NH₃/kg FPCM bij de Kwatrijnstal, 2,1 g NH₃/kg FPCM bij de referentiestal en 2,0 g NH₃/kg FPCM volgens de standaard RAV-norm van 13 kg NH₃/dierplaats/jaar (na omrekening met standaardwaardes voor melkproductie en stalbezetting). Onze conclusie is dat de Kwatrijnstal, ondanks het zeer open ontwerp met extra ruimte voor de dieren, op de meetdagen een substantieel lagere ammoniakemissie heeft dan de conventionele, meer gesloten stal met roostervloer.

Methaanemissies op stalniveau zijn bepaald met de data uit de pluimmetingen, en zijn uitgerekend per dier en per kg FPCM. In alle gevallen was de methaanemissie van de Kwatrijnstal lager dan de referentie.

Met meetboxen werden aan de westzijde van de Kwatrijnstal metingen op de vloer uitgevoerd. Deze metingen laten zien dat met mest besmeurde vloeroppervlak een 20-40 maal hogere NH₃ emissie kan hebben dan vloeroppervlak dat net schoongemaakt is door de mestrobot. De mestrobot is daarmee een belangrijke factor in de reductie van ammoniakemissie. De boxmetingen lieten een hoge methaanemissie zien, wanneer deze boven een gierafvoergat werden uitgevoerd. Dit duidt op methaanvorming in de gierkelder. Verlaging van deze puntemissie kan daarom de totale methaanemissie van de stal verder verlagen. Er zijn geen boxmetingen bij de referentiestal uitgevoerd.

Tenslotte werd er met een set van 6 windtunnels gemeten aan de ammoniakemissie bij gesimuleerd uitrijden van vaste mest, gier (beide Kwatrijnstal) en drijfmest (referentiestal). Conclusie van deze metingen is dat het scheiden van de mest geen groot voordeel lijkt te geven bij mestaanwending: de som van de gedurende 4-5 uur gemeten emissie uit gier en vaste mest ligt in de buurt van de emissie van de drijfmest. Het is evenwel goed mogelijk dat bij een meting over een langere periode (bijvoorbeeld 96 uur) wel een verschil optreedt. Dit zou in een vervolgmeting kunnen worden gedaan. Hoewel dit niet noodzakelijk lijkt te zijn, kunnen aanvullende emissiereducerende maatregelen bij het uitrijden van de gierfractie naar verwachting effectief de ammoniakemissie bij uitrijden verlagen.

Voor deze emissiemetingen is een set van verschillende methoden en instrumenten gebruikt. Innovatief in wetenschappelijk opzicht is de afleiding van de NH₃ emissie via methaan, de combinatie van box-, windtunnel- en pluimmetingen en de open-padmetingen benedenwinds van de stal gedurende een langere tijd. Deze laatste dataset kon binnen het bestek van deze opdracht niet meer worden uitgewerkt.

1 Inleiding

In Nederland is dierlijke mest de belangrijkste bron van ammoniakemissie (Erisman, 2000). Hierin spelen emissies uit de stallen, uit de mestopslag en bij mestaanwending de grootste rol. Het reduceren van ammoniakemissie uit de landbouw, met aandacht voor de genoemde bronnen, is in toenemende mate een maatschappelijke wens vanwege de effecten van stikstofdepositie op de natuur. De Provincie Noord-Brabant stelt sinds 2010 aanvullende eisen aan de ammoniakemissie uit stallen. Met ingang van 2022 moeten ook bestaande huisvestingsstalsystemen voor rundvee ouder dan 20 jaar en die niet voldoen aan de maximale emissiewaarden gaan voldoen aan de eisen. Dit heeft gevolgen voor de melkveestallen in Noord-Brabant. Boeren met een stal ouder dan 20 jaar moeten voor 1-1-2020 hun vergunning voor de ombouw van het stalsysteem aanvragen en in 2022 moet het stalsysteem aangepast zijn. Om voldoende betaalbare alternatieven op een rij te zetten is er noodzaak voor innovatie en ontwikkeling van nieuwe typen emissiearme stallen.

Nabij Kaatsheuvel in Noord-Brabant is de eerste Kwatrijnstal van Nederland gebouwd. De Kwatrijnstal is ontworpen vanuit een totaalconcept voor optimalisatie van dierenwelzijn, milieu, energie, landschap en maatschappij (zie www.kwatrijn.com). Het voorliggende rapport legt de focus op emissies, met name ammoniak. De Kwatrijnstal is voorzien van een nieuw type vloer waarop de vloeibare fractie (urine) en de vaste fractie (mest) apart worden verzameld. Bij dit systeem zakt de urine via gaatjes in de vloer naar beneden en wordt apart verzameld in een ondergrondse gierput. De vaste mest blijft op de vloer liggen en wordt met een speciaal ontworpen mestrobot geschoven en verzameld voor transport naar de mestopslag. Door dit systeem is naar verwachting een lagere ammoniumproductie in de mest (minder omzetting organisch gebonden stikstof in ammonium), en een lagere ammoniakemissie uit de stal en bij aanwending (Bos, 2012).

Op voorspraak van de Stichting Duinboeren heeft de Provincie Noord-Brabant oriënterende metingen gefaciliteerd om te toetsten of het ontwerpconcept van de Kwatrijnstal inderdaad tot lagere emissies leidt. Hierbij is naast ammoniak ook methaan en lachgas gemeten. Deze metingen hebben plaatsgevonden in januari en februari 2018 en werden uitgevoerd door TNO (voorheen ECN). Er zijn verschillende meetmethoden gebruikt: mobiele metingen, boxmetingen, windtunnelmetingen, sensormetingen en open-padmetingen.

Primaire doel was een eerste indicatie te krijgen van de ammoniak- en methaanemissie van de Kwatrijnstal tijdens de stalperiode, in vergelijking met een referentiestal in de directe omgeving (conventionele roostervloer en een eveneens biologische bedrijfsvoering). Belangrijk was daarnaast om een totaalbeeld te krijgen, dus niet alleen de emissies van de stal en mestopslag, maar ook een indicatie van emissies bij mestaanwending.

De metingen zijn uitgevoerd in nauwe samenwerking tussen het Louis Bolk Instituut, het Energieonderzoekcentrum Nederland (ECN, per 1 april 2018 onderdeel van TNO) en Antonissen Agrarisch Advies. In deze rapportage worden de bevindingen van deze metingen gepresenteerd.

2 Materiaal en methoden

2.1 Stallen

2.1.1 Kwatrijnstal

In de Kwatrijnstal van Sjaak en Suzanne Sprangers worden Jerseykoeien gehuisvest en gevoerd op biologische wijze. De stal is ontworpen vanuit een totaalvisie op dierenwelzijn, milieu, energie, landschap en maatschappij (zie www.kwatrijn.com en Bos (2012)).

Hieronder de belangrijkste kenmerken van de Kwatrijnstal die voor dit rapport van belang zijn:

- De Kwatrijnstal is aan de twee lange zijden en aan één korte zijde open tot het dak.
- De vloerdelen, van origine Swaans beton G2, zijn aangepast en voorzien van gaten waar de meeste urine direct bij excretie in wegloopt onder de vloer naar de gieropslag. De vaste mest blijft op de vloer liggen tot de schuifrobot langskomt, en de mest naar het transportsysteem brengt die het naar de mesthoop vervoert. De robot neemt ook stro mee dat van de ligboxen op de stalvloer schuift.
- De mestrobot maakt 7 maal per dag een volledige ronde door de stal.
- De gieropslag is met kleppen afgesloten.
- De mestopslag is in de stal (noordkant) en open. Het vocht dat uit de mesthoop komt vloeit naar de gieropslag.

Verdere stalgegevens op de meetdag (24 januari 2018) zijn te vinden in tabellen 1, 2 en 3.

2.1.2 Referentiestal

Als referentie voor de vergelijking van de Kwatrijnstal is een nabij gelegen standaard ligboxenstal met roostervloer gebruikt van Dorus van Loon. Ook dit bedrijf is biologisch, met HF koeien. De stal ligt hemelsbreed op 700 m afstand van de Kwatrijnstal, waardoor pluimmetingen tijdens dezelfde dag uitgevoerd konden worden (en dus ook onder dezelfde weersomstandigheden). Verdere stalgegevens op de meetdag zijn te vinden in tabellen 1,2 en 3.

2.1.3 Dieren, oppervlaktes, melkproductie

Een overzicht van het aantal dieren is gegeven in Tabel 1. Het totaal aantal dieren ouder dan 2 jaar was nagenoeg gelijk in beide stallen, waarvan in de referentiestal 19% drachtig jongvee was en in de Kwatrijnstal 0%. Volgens de Regeling ammoniak en veehouderij (RAV) wordt de ammoniak-emissie bepaald per dierplaats per jaar. Hierbij is het aantal dierplaatsen gelijk aan het aantal ligboxen, met randvoorwaarden onder andere qua maximum percentage droogstaande koeien, jongvee en leegstand (Ogink et al., 2014). De leegstand was op de meetdag in beide stallen hoger dan 10%, wat hoger is dan de maximale leegstand volgens het RAV-meetprotocol.

Tabel 1: Stalgegevens op 24 januari 2018: bezetting en aantal dierplaatsen

	melkkoe (lact.)	melkkoe (droog)	vaars drachtig	dieren >2 jr	jongvee <2 jr	dieren totaal	ligboxen	leegstand ligboxen
	n	n	n	n	n	n	n	% *
Referentie	46	1	11	58	11	69	70	17
Kwatrijn	55	0	0	55	11	66	72	24

* Volgens het RAV-meetprotocol mag maximaal 10% leegstand zijn

De Kwatrijnstal is veel ruimer opgezet dan de referentiestal, met daardoor 2 tot 3 keer zoveel 'besmeurd oppervlak' totaal en per dier of per ligbox (Tabel 2).

Tabel 2: Stalgegevens op 24 januari 2018: oppervlaktes (in m²)

	besm. opp. (excl. stro) *	besm. opp. (incl. stro) **	besm. opp. per dier >2jr	besm. opp. per dier (totaal)	besm.opp. per ligbox
Referentie	243	277	4,2	4,0	3,5
Kwatrijn	570	846	10,4	12,8	7,9

* besmeurd oppervlak exclusief staldelen met stro (jongvee, ligboxen)

** besmeurd oppervlak inclusief jongveestal (stro-stal), exclusief ligboxen

Voor het berekenen van emissiefactoren wordt geen onderscheid wordt gemaakt tussen rundveerassen (Persoonlijke mededeling, M. Goedhart, RvO 2018). Alhoewel Jerseykoeien, zoals in de Kwatrijnstal, qua gewicht en melkproductie zeer verschillend zijn ten opzichte van HF koeien (Tabel 3). Omdat Jerseykoeien duidelijk kleiner zijn en minder melk produceren zou theoretisch de ammoniakemissie per dier(plaats) bij Jerseykoeien lager zijn dan bij HF koeien (bij vergelijking in twee gelijke stallen qua oppervlak en melkproductie op stalniveau). Om dit effect te verminderen is in dit rapport de ammoniakemissie niet alleen per dier(plaats) berekend, maar ook per liter melk (op de meetdag gemeten), gecorrigeerd voor vet en eiwit percentage voor een betere vergelijking (Tabel 3). Hiermee is ook een vergelijk mogelijk met standaard melkveehouderij zoals gebruikt voor de RAV-ammoniakemissiefactoren ("RAV").

Tabel 3: Melkproductie op 24 januari (omgerekend naar 305 dagen lactatie)

	Ras	Gewicht kg/koe	Melk kg/koe/jr	FPCM * kg/koe/jr	Eiwit %	Vet %	Melkureum mg/100g
"RAV" **	HF	650	8360	8850	3,54	4,39	23
Referentie	HF	650	6649	6620	3,34	3,95	23
Kwatrijn	Jersey	350	5636	7068	4,03	5,82	22

* melkproductie gestandaardiseerd voor vet- en eiwitpercentage

** "RAV": gemiddelde waardes gangbare melkveehouderij 2016 (bronnen: Binternet; Ogink et al. (2014))

2.2 Mestanalyses

De mest die gebruikt is in de windtunnels voor de simulatie van uitrijden van mest zijn geanalyseerd, de resultaten van de analyse zijn weergegeven in Tabel 4. De standaardwaardes van vergelijkbare mestsoorten zijn weergegeven in Tabel 5.

De drijfmest uit de referentiestal was iets droger maar had lagere totaal stikstof (N) en totaal ammoniakale stikstof (TAN; NH₃-N) gehalten dan de gemiddelde drijfmest (gangbaar). Reden voor de verschillen kan zijn dat de referentiedrijfmest van een biologisch bedrijf komt door de lagere N gehalten in het voer dan bij gangbare bedrijven.

De mest van de Kwatrijnstal was echter meer afwijkend dan standaardgetallen voor vergelijkbare mestsoorten: zowel de vaste mest als de gier was dunner (lagere DS gehalte). Voor de vaste mest is dit mogelijk door meer verdunning met urine en spoelwater dan grupstalmest. Stikstofgehalten waren lager in de Kwatrijnstal dan in de referentiestal. Ook hier kan de biologische bedrijfsvoering deels de verklaring zijn. Wel is opvallend dat het aandeel ammoniakale N (NH₃-N/totaal N) veel lager is in de Kwatrijnmest dan in de standaardmest en ook dan in de referentiedrijfmest.

Tabel 4: Gehalten van de mestsoorten gebruikt in de windtunnelmetingen op 24 januari 2018.

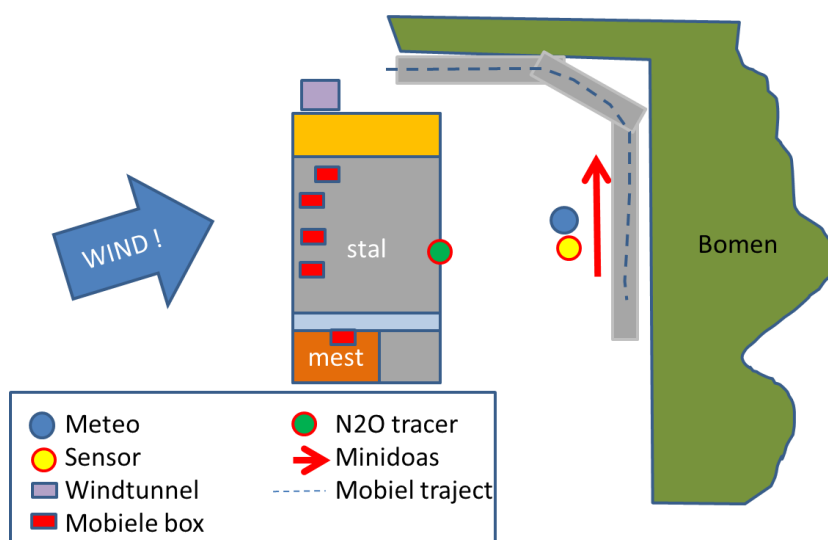
Parameter	Eenheid	Drijfmest (referentie)	Vaste mest (Kwatrijn)	Gier (Kwatrijn)
Droge stof (DS)	kg/ton	98	173	16
Totaal N	kg/ton	3,44	4,94	1,28
NH ₃ -N (TAN)	kg/ton	1,72	0,80	0,92
NH ₃ -N / totaal N	-	0,50	0,16	0,72
pH	-	7,1	8,1	6,4
Organische stof	kg/ton	71	129	7
P ₂ O ₅	kg/ton	1,4	2,1	0,4
K ₂ O	kg/ton	4,3	5,8	4,2
S	% DS	0,21	0,14	0,04

Tabel 5: Standaardwaarden van mestsoorten uit Handboek mest en compost (Bokhorst en Ter Berg, 2001)

Parameter	Eenheid	Drijfmest (rundvee)	Vaste mest (rundvee grup)	Gier (rundvee)
Droge stof (DS)	kg/ton	90	235	25
Totaal N	kg/ton	4,9	6,9	4,0
NH ₃ -N (TAN)	kg/ton	2,6	1,6	3,8
NH ₃ -N / totaal N	-	0,53	0,23	0,95

2.3 Emissiemetingen

Figuur 1 geeft de schematische opstelling weer van de meetopstelling. Op de dag van de pluimmetingen (24 en 26 januari) kwam de wind vanuit het westen (zie blauwe pijl). Ten behoeve van de mobiele metingen zijn rijplaten op het weiland gelegd ten oosten en zuidoosten van de stal. Vlak naast het pad van de mobiele metingen was het pad van de mini-DOAS. Dit apparaat meet de ammoniakconcentratie over een pad in de buitenlucht. Vergeleken met conventionele nat-chemische meetapparatuur kan hiermee met veel hogere frequentie gemeten worden (1 meting per seconde). Ook een ammoniaksensor in ontwikkeling bij TNO (voorheen ECN) was naast de mini-DOAS opgesteld, evenals een sonic anemometer om de windrichting en windsnelheid continu te monitoren.



Figuur 1: Schematische weergave van de opstelling rond de Kwatrijnstal.

De verschillende meetmethoden die zijn ingezet hebben verschillende doelen:

Met de tunnelmetingen wordt gekeken hoe de NH₃ emissie bij gesimuleerde aanwending van drijfmest zich verhoudt tot die bij aanwending van de vaste mest en gier uit de Kwatrijnstal.

De boxmetingen gebruiken we om een beeld te krijgen van de verschillen in emissies tussen verschillende delen van de vloer/de stal in termen van NH₃/CH₄ /N₂O emissie. Daarmee wordt ook het effect van de mestrobot zichtbaar gemaakt

De pluimmetingen zijn het belangrijkste, daarmee leren we hoe de totaal NH₃/CH₄ /N₂O emissie van de Kwatrijnstal zich verhoudt tot die van de referentiestal. We krijgen met deze metingen een indruk van de NH₃ emissie. Die is representatief voor de meetdag maar wordt uitgedrukt in kg NH₃/dierplaats/jaar om te kunnen vergelijken met de normwaarden

Met de Mini-DOAS en sensor meting kunnen we zien hoe representatief de bovenstaande metingen (op een dag) zijn voor een langere episode.

2.3.1 Gebruikte meetinstrumenten

In deze meetcampagne zijn twee Quantum Cascade Laser (QCL, Aerodyne) spectrometers ingezet. De QCL-1 meet ammoniak (NH₃) en een tweede QCL-ICL systeem methaan (CH₄), lachgas (N₂O), water, kooldioxide, koolmonoxide, methanol, formaldehyde en ethaan met een maximum meetfrequentie van 10 metingen per seconde. Deze instrumenten zijn zeer gevoelig en kunnen hierdoor ook de variatie in de achtergrondconcentratie van de componenten in de lucht te detecteren, dat maakt het mogelijk om op afstand van de stal de pluim te meten (waar de concentratieniveaus door verdunning laag zijn). Ook zorgt de hoge meetfrequentie ervoor dat ook eventuele hoge concentraties (bijvoorbeeld tijdens de boxmetingen) heel snel gemeten kunnen worden. Het eerste instrument (QCL-1) is het enige instrument in Nederland van dit type waarmee dit soort metingen goed uitgevoerd kunnen worden. Het tweede instrument is een generatie nieuwer en vele malen gevoeliger, maar dit instrument kan geen NH₃ meten. Bij de windtunnel metingen hebben we de QCL-1 metingen vergeleken met die van een Picarro CRD systeem. Deze kan de concentratieniveaus die we meten goed bepalen maar met minuut-resolutie in plaats van seconde-resolutie. Op afstand van de stal hebben we een aantal weken een mini-DOAS geplaatst (instrument ontwikkeld door ECN en RIVM). Dit instrument is gevoelig en snel maar heeft een open pad meetlengte van minimaal 20 meter. Het is daarmee goed bruikbaar voor stationaire pluimmetingen maar (nog) niet voor mobiele en box- of windtunnel-metingen.

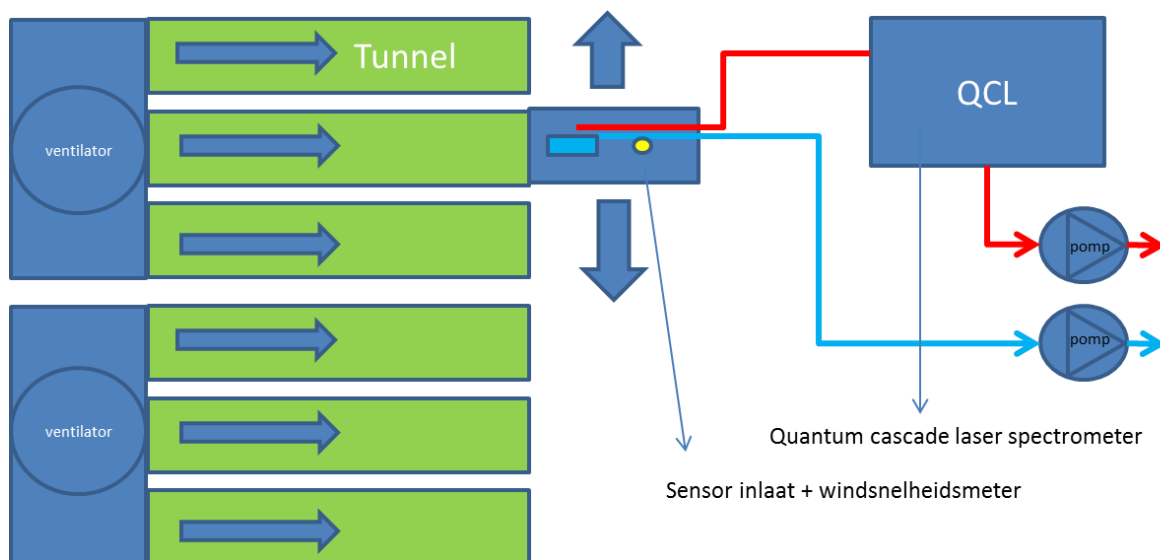
2.3.2 Windtunnelmetingen (simulatie van mest uitrijden)

Bij de uitgevoerde windtunneltesten werd mest aangebracht op graszoden. De ammoniakconcentraties werden gemeten met de QCL die werden gekoppeld aan een set windtunnels. Daarnaast werd op tunnel nummer 1 continu de NH₃-concentratie gemeten met het Picarro CRD systeem. De opstelling bestond uit twee sets van drie windtunnels (dus drie behandelingen in duplo: drijfmest, vaste mest, gier), iedere tunnel had een bak voor de graszoden met een oppervlak van 40x180 cm (zie **Figuur 2**). Aan de ene kant van de tunnel stond een ventilator op een verdeelkast die een gelijke luchtstroom over de drie aangesloten tunnels verdeelde. Aan het andere uiteinde was de tunnel open en vóór de opening werd een verplaatsbaar, kort tunnelsegment gereden met daarin een windsnelheidsmeter en een speciaal geconfigureerde inlaat naar de QCL (voor schematische tekening zie **Figuur 3**). Deze glas-geblazen

inlaat heeft een aansluiting voor twee pompen. Eén pomp zorgt voor een hoge inlaatsnelheid van de lucht, de andere pomp zuigt in tegenstroom het gas af door een op onderdruk geregelde verwarmde inlaatleiding die naar de meetcel van de QCLs loopt. De sampleflow is rond de 20 L/minuut bij een onderdruk in de cel van 0,1 bar, dit zorgt voor een zeer snelle verversing van de lucht in de meetcel. Hierdoor is de QCL in staat concentratieveranderingen binnen seconden in beeld te brengen.



Figuur 2: Foto van de windtunnelopstelling.



Figuur 3: Schematische opzet van de windtunnelset.

Deze metingen zijn geschikt voor gebruik in relatieve zin. Windtunnels zijn per definitie niet het meest geschikt om de NH_3 -emissie in absolute zin te evalueren. Ammoniak laat zich moeilijk meten omdat het 'plakt' aan wanden, inlaatleidingen en filters en dat geeft een beperking voor het gebruik van box- en tunnelmetingen in absolute zin. Maar omdat de condities hier voor alle

bemestingsmethoden vergelijkbaar zijn en de metingen quasi-simultaan (steeds een minuut per box) worden uitgevoerd, zijn wel conclusies over het relatief gedrag van het emissiepatroon vanuit de verschillende bakken af te leiden.

Voor de windtunnelmetingen waren de bakken gevuld met grond en daarbovenop waren vers gesneden graszoden gelegd. Hierop is de mest handmatig aangebracht, zoveel mogelijk op de manier waarop de betreffende mestsoort in de praktijk wordt aangebracht:

- Voor de drijfmest is de werking van de zodebemester nagebootst: in de graszode in de bak zijn in de lengte 2 parallelle sneden gemaakt (op 18 cm afstand van elkaar), waarin de mest gegoten is.
- De vaste mest is op het gras uitgespreid in 'stukjes' zoals dat gebeurt met een mestverspreider.
- De gier is met een gieter met sproeikop op het gras gespreid.

Mesthoeveelheden zijn afgestemd met de veehouders. Voor de referentiedrijfmest is het equivalent van 20 ton/ha opgebracht, voor de vaste mest en voor de gier van de Kwatrijnstal elk 10 ton/ha: totaal Kwatrijnmest dus ook 20 ton/ha, maar beide fracties zijn apart opgebracht. Voor de proef is deze verhouding van vaste mest en gier van 1:1 aangenomen omdat de werkelijke verhouding die per jaar in de Kwatrijnstal wordt geproduceerd (nog) niet bekend is bij de veehouder. Deze verhouding is afhankelijk van de primaire mest- en urineproductie van de koeien (in Bannink et al. (1999) is de ratio mest:urine 1,3 tot 2,0; in Vaddella et al. (2010) wordt de ratio 1,7 gebruikt), het strogebruik (verhoging van de mest:urine-ratio), vermenging van mest en urine op de stalvloer en het vloeien van mestvocht en spoelwater in de gierkelder (verlaging van de mest:urine-ratio).

2.3.3 Boxmetingen

De twee QCL's zijn ook ingezet voor boxmetingen. Voor de boxmetingen wordt een box op de stalvloer gezet (zie Figuur 4). Bij emissie vanuit de vloer zal de ammoniakconcentratie oplopen door het plaatsen van de box. De helling van de stijging van de ammoniakconcentratie is vervolgens een maat voor de ammoniakemissie. (Hensen et al, 2006)



Figuur 4: Boxmetingen op de stalvloer, met de twee QCL's in de meetwagen met aanzuiging vanuit de box

2.3.4 Pluimmetingen

Bij de mobiele metingen zijn er twee Quantum Cascade Lasers (QCL) van Aerodyne gebruikt. Eén van de QCL's meet de concentratie van ammoniak. De andere QCL meet methaan, ethaan, koolstofdioxide, koolstofmonoxide, lachgas, methanol. Beide zijn achter de meetwagen geplaatst zodat de pluim van de stal gemeten kon worden. Om een nauwkeurige schatting van de emissie van de pluim te kunnen meten is lachgas als tracer losgelaten nabij de stal (zie groene stip in Figuur 1, en Figuur 5). Doordat de emissie van lachgas bekend is en vervolgens ook in de pluim wordt gemeten kan de verhouding tussen emissie en concentratie bepaald worden (Hensen & Scharff, 2001). Dezelfde verhouding wordt vervolgens gebruikt om de ammoniakemissie te bepalen met behulp van de ammoniakconcentratie metingen.



Figuur 5: Meetwagen rijdend benedenwinds van de kwatrijstal en op de voorgrond de lachgas tracer.

2.3.5 Mini-DOAS

De gebruikte mini-DOAS is een door RIVM/ECN samen ontwikkeld instrument (nadere beschrijving van het instrument is gedocumenteerd in Volten *et al.* 2012). In de aluminium kist in Figuur 6 is het instrument geplaatst. De uitgaande bundel van een xenon lamp heeft naast zichtbaar licht ook een ultra violette component. In dat golflengtegebied absorbeert ammoniak, samen met stikstofmonoxide en zwaveldioxide een deel van de lichtbundel. De resterende lichtbundel wordt op ongeveer 20 meter afstand opgevangen door een retroreflector en weer retour instrument gestuurd. Daar gaat het licht door een interferentiefilter dat het zichtbare gedeelte van het spectrum blokkeert maar het deel met de ammoniakabsorptie doorlaat. De bundel wordt gefocust op een spectrometer die vervolgens de absorptielijnen in beeld kan brengen. Hoe dieper de absorptielijn is, hoe meer ammoniak er tussen de lamp en de retroreflector zit. Dit meetsysteem heeft als groot voordeel dat er geen contactoppervlak is waaraan NH_3 kan vastplakken of weer af kan komen, wat voor nagenoeg alle andere meetsystemen een probleem is. Het meetsysteem is een 7 weken benedenwinds van de stal blijven staan. Binnen dit project was het niet mogelijk alle beschikbare data uit te werken.



Figuur 6: De mini-DOAS en de windmeter aan de oostzijde van de kwatrijnstal

2.4 Vergelijking met RAV-waardes

Om een idee te krijgen van de geldigheid van onze ammoniakemissiemeting is emissie van de referentiestal vergeleken met die uit de RAV lijst. Hiervoor is uitgegaan van categorie A1.100 (“overige huisvestingsystemen”) bij opstallen: 13 kg NH₃/dierplaats/jaar. Voor de vergelijking is dit getal is daarnaast ook teruggerekend naar g NH₃/kg melk bij een leegstand van de stal van 10%, een aandeel drachtig jongvee van 20% (aannames) en de melkproductie zoals in Tabel 3 gegeven.

3 Resultaten

3.1 Windtunnelmetingen (simulatie van mest uitrijden)

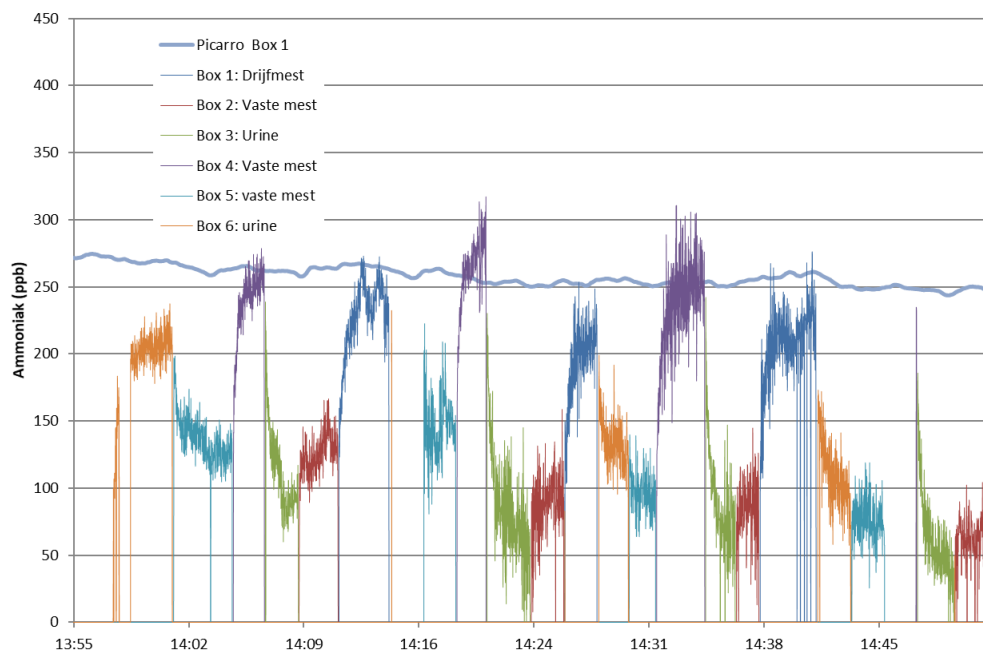
In **Tabel 6** is de hoeveelheid aangebrachte totaal N en ammoniakale N (TAN) per windtunnel-bak per behandeling berekend op basis van gehalten uit Tabel 4. Opvallend is dat met de drijfmest van de referentiestal ongeveer evenveel totaal N is gebracht als met de som van vaste mest en gier uit de Kwatrijstal, maar 2 maal zoveel TAN.

Tabel 6. Opgebrachte mest in de windtunnels voor simulatie van uitrijden (24 januari 2018)

Parameter	Eenheid	Drijfmest (referentie)	Vaste mest (Kwatrijn)	Gier (Kwatrijn)
Mesthoeveelheid	ton/ha	20	10	10
	kg/bak*	1,20	0,60	0,60
Totaal N	g/bak	4,1	3,0	0,8
NH3-N (TAN)	g/bak	2,1	0,5	0,6

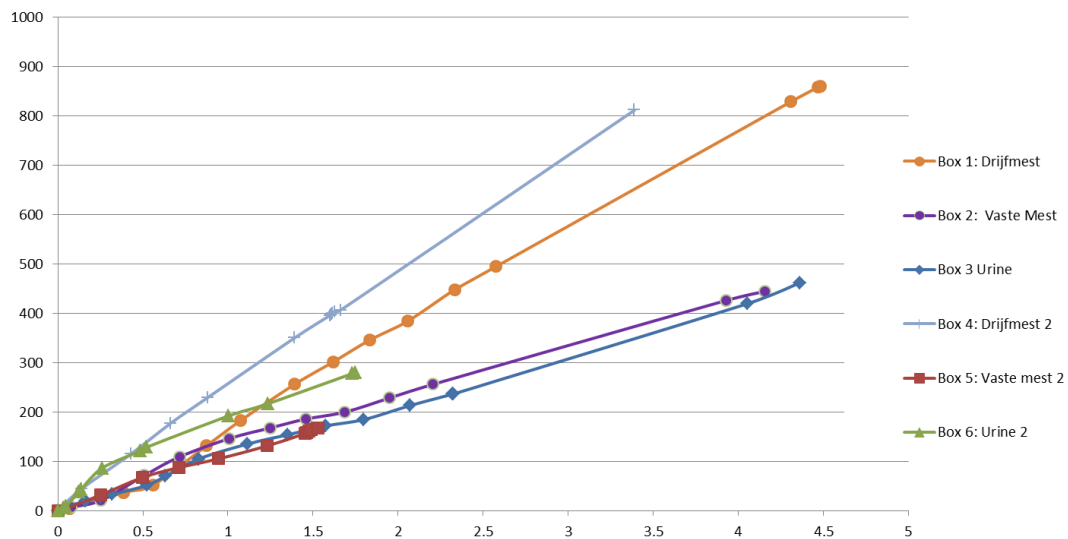
* bakken waren $0.35 \times 1.72 = 0.60 \text{ m}^2$.

In Figuur 7 is een voorbeeld te zien van een stuk ruwe data van de QCL. De verschillende kleuren in de grafiek geven aan wanneer er op welke bak gemeten wordt. Het is goed te zien dat bij het overschakelen van de ene naar de andere bak tussen de 5-20 seconden nodig is om het hele meetsysteem weer op het nieuw aangeboden concentratie niveau te krijgen. Dat is het gevolg van de inlaat en het gebruik van een optische cel. De concentratieverschillen zijn groot genoeg om goed te kunnen meten, voor de emissieschatting zijn de laatste 10-20 seconden van de metingen per tunnel gebruikt.



Figuur 7: Voorbeeld van een deel van de dataset waarbij de metingen per box te zien zijn.

De blauwe lijn in Figuur 7, die boven de gekleurde “zaagtand” loopt is de tijdserie van de NH₃ concentraties gemeten met de Picarro in windtunnel nummer 1. Dit instrument geeft een 10% hogere waarde dan de NH₃-QCL.



Figuur 8: Cumulatieve NH₃ emissies voor drijfmest, vaste mest en urine (gier) in duplo.

De cumulatieve emissie per tunnel volgt uit deze metingen en is weergegeven in **Figuur 8**. De twee bovenste lijnen in **Figuur 8** geven de cumulatieve emissie van de drijfmest weer. Deze liggen ongeveer een factor 2 boven de emissies van de urine (gier) en van de vaste mest. De som van emissie van de urine en de vaste mest komt ongeveer op eenzelfde emissieniveau als van de drijfmest. Het is mogelijk dat er wel verschillen zichtbaar zouden worden bij een langer meettraject. Doordat het emitterend oppervlak van de vaste mest (stukjes op het gras) en de gier (besproeid op het gras) veel groter is dan dat van drijfmest in een geultje zou de emissie in theorie eerder moeten stoppen. Bovendien was de hoeveelheid aangebrachte TAN lager bij de Kwatrijnmest. Dit zou bevestigd kunnen worden met een langere meting, bijvoorbeeld van 96 uur (in plaats van de hier gemeten 4,5 uur).

Conclusie:

- We zien duidelijk meetbare verschillen tussen de tunnels, meet-technisch in orde.
- Als de emissie van gier en vaste mest wordt opgeteld zit dat dicht tegen de emissie van drijfmest aan.

Voorbehoud:

- De metingen dekken maar enkele uren, het kan zijn dat er een verschil later optreedt. De nu gebruikte QCL is in staat de ammoniakconcentratie goed te meten zolang die boven de 20 µg/m³ blijft, dat niveau wordt meestal op een tweede dag bereikt. Daarna moet een ander (gevoeliger maar trager) instrument gebruikt worden.

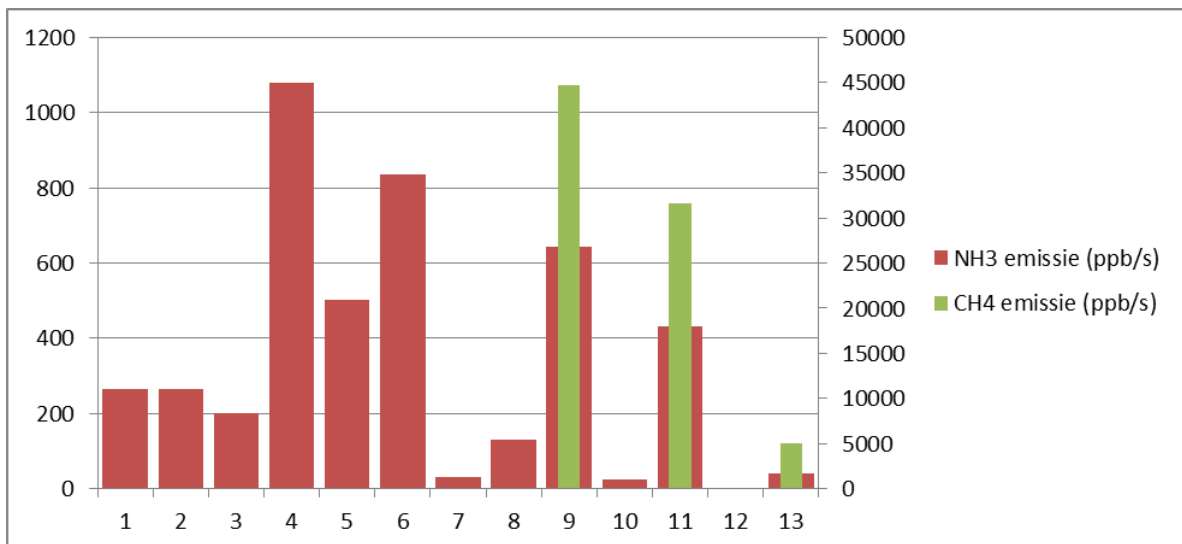
3.2 Boxmetingen

De resultaten van de boxmetingen zijn weergegeven in **Tabel 7** en **Figuur 10**. Op dertien locaties in de Kwatrijnstal werd de meetbox geplaatst en gedurende 1-3 minuten werd gemeten hoe snel de hoeveelheid NH₃, CH₄ of N₂O in de meetbox stijgt. Uit de stijging is de emissie vanaf het oppervlak

berekend. Op de foto's in **Figuur 9** zijn van 12 van de 13 meetplekken te zien (bij de eerste plek ontbreekt een foto). De emissiegetallen zijn uitgedrukt in ppb/seconde, de snelheid waarmee de concentratie in de box stijgt.



Figuur 9: Compositie van 12 foto's (meetplekken 2 t/m 13).



Figuur 10 : Emissie per locatie in ppb/sec voor NH₃ in rood (linker as) en methaan in groen (rechter as)

Tabel 7. emissie per meetlocatie

Box	Tijd	NH3 emissie ug/m2/s	CH4 emissie (ug/m2/s)	Locatie
1	24-1-2018 15:55	31	Geen emissie	testmeting
2	24-1-2018 16:08	31	2	hoek besmeurd
3	24-1-2018 16:11	23	2	bij ligbox vooraan
4	24-1-2018 16:13	125	1	bij ligbox nat
5	24-1-2018 16:16	58	1	bij voergang besmeurd
6	24-1-2018 16:20	97	1	gladde vloer nat (melk uitloop)
7	24-1-2018 16:24	4	Geen stijging, alleen na verwijderen box	gladde vloer droog
8	24-1-2018 16:26	15	1	bij voergang zonder gat
9	24-1-2018 16:30	75	4877	bij voergang met gat
10	24-1-2018 16:34	3	3	relatief droog geen gat in de vloer
11	24-1-2018 16:37	50	3452	relatief droog met gat in de vloer
12	24-1-2018 16:42	Geen stijgende lijn	Geen stijgende lijn	potstalstro
13	24-1-2018 16:48	5	556	potstal mesthoop
	Gemiddeld	43	889	
	mediaan	31	2	
	STD	39	1767	
	Rel std %	25%	55%	
	ratio max/min	41		
	Oppervlak (m2)	570		
	Emissie schatting *100 kg/y	8 ± 2		

De emissie van ammoniak verschilt met een factor 40 tussen de hoogste en laagste emissiewaarde. Voor methaan is het verschil veel groter: de emissie is overal erg klein behalve op de mesthoop en op de twee plekken waarbij de meetbox geplaatst is over een stuk vloer met een gat (urineafvoer) .

Als we als eerste orde schatting het gemiddelde van de 13 metingen gebruiken en dat vermenigvuldigen met 570 m² besmeurd oppervlak dan zou dat op jaarbasis rond de 8 ± 2 * 100 kg NH₃ opleveren. De onzekerheidsmarge van 25% is optimistisch bij deze kleine steekproef maar volgt uit de relatieve fout (standaarddeviatie van de set gedeeld door de wortel uit het aantal metingen). Bij een bezetting van de stal van 50% (de helft van het jaar zijn de dieren in de stal) zou dat in termen van emissiefactor bij 55 dieren neerkomen op 7 ± 2 kg NH₃/dier/jaar.

Ook voor methaan zijn de emissies uitgerekend per locatie. Bij ammoniak is een gemiddeld getal bij 13 metingen nog bruikbaar, maar bij methaan is de gemiddelde bepaald met de 2-3 hoge emissie locaties. Dit is te laag voor een goede schatting. Conclusie:

- Metingen lukken technisch goed, de emissieschatting komt opgeschaald overeen met 15 ± 4 kg NH₃/dier/jaar als de emissie op alle dagen van het jaar net zo hoog zou zijn. Als we er rekening mee houden dat de dieren 50% van het jaar buiten de stal staan zou de emissie voor de stal daarmee halveren naar 7 ± 2 kg NH₃/dier/jaar. We raden echter af om deze getallen nu al in absolute zin te gebruiken want: het aantal metingen is te klein, alleen representatief voor deze meetdag en de boxmetingen zijn principieel niet optimaal voor ammoniak (vanwege het plakken aan onder andere wanden).
- De getallen zijn wel bruikbaar in relatieve zin en geven een goed beeld van hoe verschillende delen van de stal zich in termen van NH₃ emissie verhouden.
- Opmerkelijk is de hoge CH₄ en N₂O emissie die we zien als we meten op een stuk van de vloer met een gat.
- De metingen suggereren een verhouding van 21 kg CH₄/kg NH₃. Dit getal is van belang bij de pluimmetingen (zie hieronder).

3.3 Pluimmetingen

De pluimmetingen zijn voor de Kwatrijnstal en voor de referentiestal in één dag uitgevoerd: 's ochtends bij de Kwatrijnstal en 's middags bij vergelijkbare meteorologische condities bij de referentiestal. Bij de Kwatrijnstal lag het meettraject op ongeveer 35 meter ten oosten van de stal. Bij de referentiestal was deze afstand ongeveer 60 meter.

Bij de Kwatrijnstal waren de pluimen van NH₃ goed meetbaar op het meettraject. In **Figuur 11** zijn de pluimen (pieken) voor ammoniak (rood) en lachgas (blauw) weergegeven. De groene lijn geeft de noord-zuid positie (in graden) van de meetwagen weer. Net voor 13:04 en rond 13:12 zijn twee duidelijke lachgaspluimen zichtbaar. Bij de andere twee meetritten is de pluim op het meest zuidelijke puntje van het meettraject opgepikt. Om de ammoniakemissie uit te rekenen wordt het oppervlak (integraal) onder zowel de ammoniak- als de lachgaspieken berekend. Voor de twee gassen geldt:

$$\text{Concentratie NH}_3 = \text{Bronsterkte NH}_3 * \text{verduunning}$$

$$\text{Concentratie N}_2\text{O} = \text{Bronsterkte N}_2\text{O} * \text{verduunning}$$

----- :

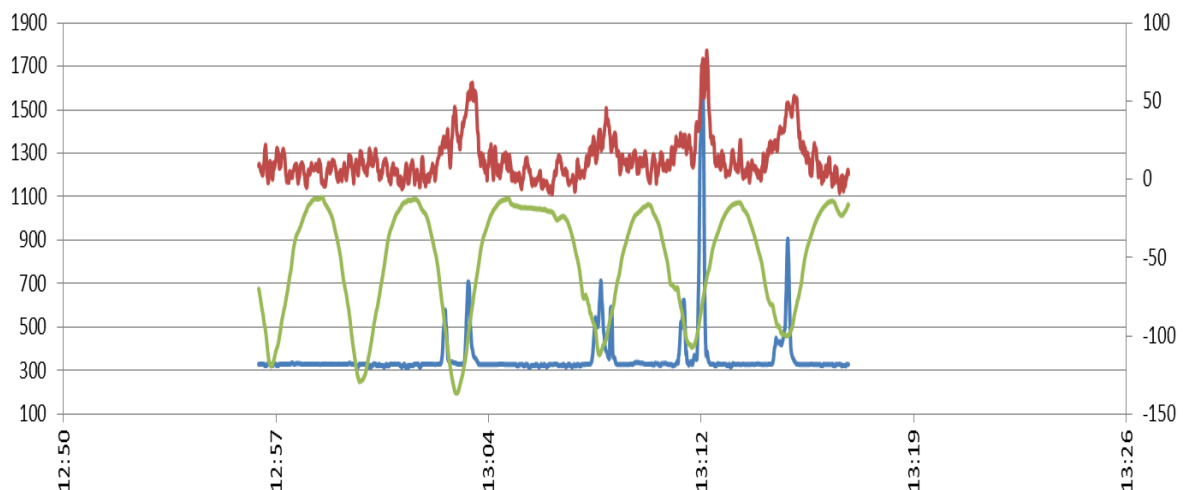
$$\text{Concentratie NH}_3 / \text{Concentratie N}_2\text{O} = \text{Bron NH}_3 / \text{Bron N}_2\text{O}$$

Of:

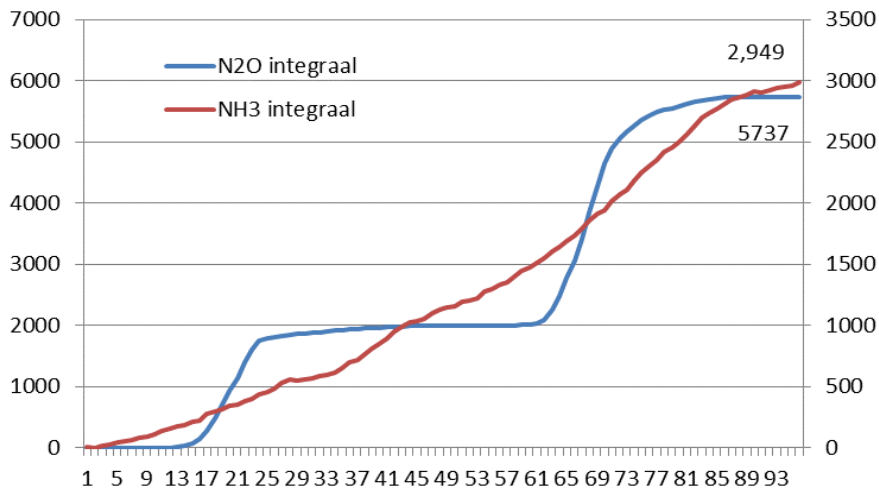
$$\text{Bron NH}_3 (\text{mol/sec}) = \text{Bron N}_2\text{O} (\text{mol/sec}) * \text{Concentratie NH}_3 (\text{ppb}) / \text{Concentratie N}_2\text{O} (\text{ppb})$$

$$\text{Bron NH}_3 (\text{g/s}) = \text{Bron NH}_3 (\text{mol/sec}) * 17$$

De bronsterkte voor N₂O was 0.083 g/sec bij de Kwatrijnstal en 0.070 g/sec bij de referentiestal.



Figuur 11: Pluimmetingen bij de Kwatrijnstal: rood zijn NH₃ pieken, breder dan de smalle N₂O pieken (blauw), groen is de positie noord-zuid (graden) dus heen en weer rijden over de rijplaten.



Figuur 12: Integratie van de pluimen van N_2O en NH_3 bij de Kwatrijnstal

Bij de Kwatrijnstal zijn uiteindelijk 5 pluimen geselecteerd waarbij lachgas, NH_3 en CH_4 goed over het meettraject kwamen. Bij de eerste set metingen was de N_2O emissie te laag, dwarrelde de pluim te veel door de matige windsnelheid of was de windrichting zodanig dat de pluim zuidelijk van het meettraject langs waaide. Uit de geïntegreerde pluimen van N_2O en NH_3 volgt dat de NH_3 emissie, opgeschaald naar een heel jaar, uit zou komen op 300 ± 75 kg NH_3 . Dit is de helft lager dan werd berekend op basis van de 13 boxmetingen. Zo'n groot verschil is goed mogelijk omdat zowel het aantal pluimmetingen als het aantal boxmetingen beperkt is. Bovendien is de emissie afhankelijk van windsnelheid, temperatuur en activiteit van de dieren. Meet-technisch is de schatting op basis van de pluimmetingen betrouwbaarder dan het getal gebaseerd op de boxmetingen, omdat de boxmetingen een willekeurige verzameling is van puntmetingen terwijl de pluimmetingen een maat is voor de gehele emissie uit de stal.

Het emissiegetal voor NH_3 kan ook worden uitgerekend door gebruik te maken van de op afstand gemeten CH_4 pluimen, daaruit volgt een CH_4 emissie die vervolgens vermenigvuldigd wordt met de verhouding tussen de CH_4 en NH_3 metingen vlakbij de stal. Voordeel hiervan is dat methaan op afstand veel nauwkeuriger te meten is dan NH_3 zelf, waardoor indirect ook de schatting voor NH_3 emissie beter is. Dichtbij de stal zijn de concentraties hoog en is de verhouding CH_4/NH_3 goed te meten.

Bij de Kwatrijnstal zijn de NH_3 pluimen die op afstand werden gevonden hoog genoeg voor directe integratie en kunnen beide methoden gebruikt worden: directe bepaling via NH_3/N_2O of indirect via CH_4 . In de pluimmetingen op afstand vinden we een gemiddelde verhouding van CH_4/NH_3 van 20 (net als bij de boxmetingen), evenals bij de metingen vlakbij de stal.

Bij een CH_4/NH_3 ratio van 20 is de naar een jaar geëxtrapolerde emissie per volwassen dier (>2 jaar) $7 \pm 0,8$ kg NH_3 /dier/jaar en $6 \pm 0,8$ kg NH_3 /dier/jaar bij de methode met directe integratie (zie Tabel 8).

Opmerkingen:

- De NH_3 concentraties zouden, op basis van de vergelijking tussen Picarro en QCL nog 10% hoger kunnen liggen.
- Deze getallen gelden uiteraard alleen voor de stalperiode. Met deze metingen kunnen we geen uitspraak doen over de emissie in de weideperiode.
- Voor het bepalen van de emissie per jaar zijn meer metingen nodig, verspreid over het jaar (RAV-protocol).

Tabel 8: Kwatrijnstal pluimmetingen. Emissieberekening met directe integratie, en berekening via CH₄ met ratio 20.

Pluim tijd	N ₂ O g/s	int N ₂ O	int CH ₄	int NH ₃	kgCH ₄ /kgNH ₃		Direct: mgNH ₃ /s	gCH ₄ /s	mgNH ₃ /s
		(ppb)	(ppb)	(ppb)	ratio		Via CH ₄		
26-1-2018 13:03	0.083	1985	19920	987	20.2	Pluim	16	0.30	16
26-1-2018 13:04	0.083	3749	38816	1958	19.8	Pluim	17	0.31	16
26-1-2018 13:09	0.083	7276	36161	1684	20.2	Pluim	7	0.15	8
26-1-2018 13:12	0.083	18259	55456	2603	20.1	Pluim	5	0.09	5
26-1-2018 13:15	0.083	6947	51553	2346	20.7	Pluim	11	0.22	12
26-1-2018 11:27			135490	6836	19.8	Stal			
26-1-2018 11:30			204620	11236	18.2	Stal			
							(*100) kgNH ₃ /jaar	CH ₄ ton/jaar	
Metingen geëxtrapoleerd naar een jaar							3.5	6.1	3.6
stdev							2		2
st. err							24%		22%
Dieren							55		55
kg/Dier/jaar							6 ± 0.8		7 ± 0.8

Voor de metingen bij de referentiestal op dezelfde dag werd dezelfde analyse uitgevoerd. Bij de metingen dichtbij de stal, met zowel hoge CH₄ als hoge NH₃ waarden vonden we een verhouding CH₄/ NH₃ van rond de 25. Door de grotere afstand tussen de stal en het meettraject waren de ammoniakpluimen minder goed meetbaar dan bij de Kwatrijnstal, maar de methaanmetingen konden nauwkeurig worden gemeten. Bij integratie van de drie pluimen waarbij er een goed meetbaar NH₃ signaal was is de emissie 6 +/- 0,3 kg NH₃ /dier/jaar. Wanneer we de in dit geval betere methode via de CH₄ metingen gebruiken (vanwege laag NH₃-signaal met veel ruis door de grotere afstand dan bij de Kwatrijnstal), komen we op 11 +/- 1,2 kg NH₃ /dier/jaar waarbij we uitgaan van 58 volwassen dieren (>2 jaar) (Tabel 9).

Tabel 9: Referentiestal pluimmetingen. Emissieberekening waarbij directe integratie, en via CH₄ met ratio 20 wordt gebruikt .

Pluim tijd	N ₂ O g/s	int N ₂ O	int CH ₄	int NH ₃	kgCH ₄ /kgNH ₃		Direct: mgNH ₃ /s	gCH ₄ /s	Indirect: gNH ₃ /s
		(ppb)	(ppb)	(ppb)	ratio		Via CH ₄		
26-1-2018 15:03	0,07	294	215			Stal 2			
26-1-2018 15:04	0,07	376	10943			Stal 2			
26-1-2018 15:09	0,07	4382	65994	1941	32	Stal 2	12	0,38	16
26-1-2018 15:12	0,07	362	8804						
26-1-2018 15:13	0,07	314	8497						
26-1-2018 15:17	0,07	2656	32318	1261	24	Stal 2	13	0,31	13
26-1-2018 15:19	0,07	962	25784			Stal 2		0,68	28
26-1-2018 15:21	0,07	399	25279						
26-1-2018 15:22	0,07	1086	19030			Stal 2		0,45	18
26-1-2018 15:24	0,07	893	29107			Stal 2		0,83	34
26-1-2018 15:26	0,07	3924	40151	1394	27	Stal 2	10	0,26	11
26-1-2018 15:42			315635	12135	24	XY analyse stallen ref			
							(*100)kgNH ₃ /jaar	CH ₄ ton/jaar	Via CH ₄ (*100)kgNH ₃ /jaar
							3,6	15	6,3
stdev							0,5		2,9
rel. st. err							8%		19%
Dieren							58		58
kg/Dier/jaar							6 ± 0,3		11 ± 1,2

De resultaten van de pluimmetingen zijn samengevat in Tabel 10. Hierin is ook een regel opgenomen met de RAV-emissie, per dierplaats (ligbox) en omgerekend per kg FPCM. Dit is enkel ter vergelijking, de metingen bij de referentie en de Kwatrijnstal zijn niet door het jaar herhaald en gelden daarom niet als RAV-waarden.

Tabel 10: Samenvattende resultaten pluimmetingen geldend voor 26-1-2018, voor vergelijking met RAV-waarden uitgedrukt in emissie per jaar.

Stal	NH ₃ kg/stal/jr	NH ₃ kg/dier>2jr/jr	NH ₃ kg/lgbx/jr	NH ₃ g/kg melk	NH ₃ g/kg FPCM
"RAV" *		13	13	2,2	2,0
Referentie	625	11	9	2,0	2,1
Kwatrijn	350	6	5	1,1	0,9

* ammoniakemissiefactor RAV-code A1.100, opstallen. De emissie per kg melk bij "RAV" is berekend met aanname van 20% jongvee, 10% leegstand en de melkproductie per koe uit Tabel 3.

Methaan

Naast de emissiegetallen voor ammoniak zijn met de pluimmetingen ook schattingen beschikbaar voor de emissie van methaan. Op basis van gewichten en melkproductie is volgens de Tier 2 methode IPCC berekend hoeveel methaanemissie we kunnen verwachten van de dieren op basis van hun gewicht en melkgift. Voor de dieren van de Kwatrijnstal komt dat op 107 kg CH₄/dier/jaar uit en voor de referentiestal op 145 kg CH₄/dier/jaar. Ook uit de mest verwachten we nog methaanemissie op basis van eenvoudige emissiefactoren voor vaste mest en drijfmest. In Tabel 11 staan de berekende en gemeten waardes. Zowel de berekende als de gemeten waardes zijn lager in de Kwatrijnstal dan in de referentiestal, dit heeft vooral te maken met het verschil in grootte tussen Jerseys en HF koeien. Uitgedrukt per dier en per kg FPCM blijven de verschillen tussen de stallen in de zelfde orde van grootte.

Tabel 11. Berekende en gemeten methaan emissies voor de twee stalsystemen.

Stal	Pens: berekend			Mest: berekend				Pens + mest kg/dag/ stal	Meting	
	kg/dier /jaar	Aantal dieren	kg/dag/ stal	Mest type	g/m ³ /dag	m ³ mest	kg/dag/ stal		kg/dag/ stal	kg/dag/ dier
Referentie	147	58	23	Drijf	53	430	22	55	23	0,40
Kwatrijn	107	55	16	Vast	40	430*	17	34	16	0,29

* Aantal m³ is op zelfde waarde gezet al in referentiestal

Conclusie is dat de methaanemissie van het Kwatrijnstalsysteem op basis van emissiegetallen en op basis van de metingen lager uitvalt dan van het referentiesysteem. De metingen op de dag in januari liggen een stuk lager dan op basis van de emissiefactoren wordt berekend.

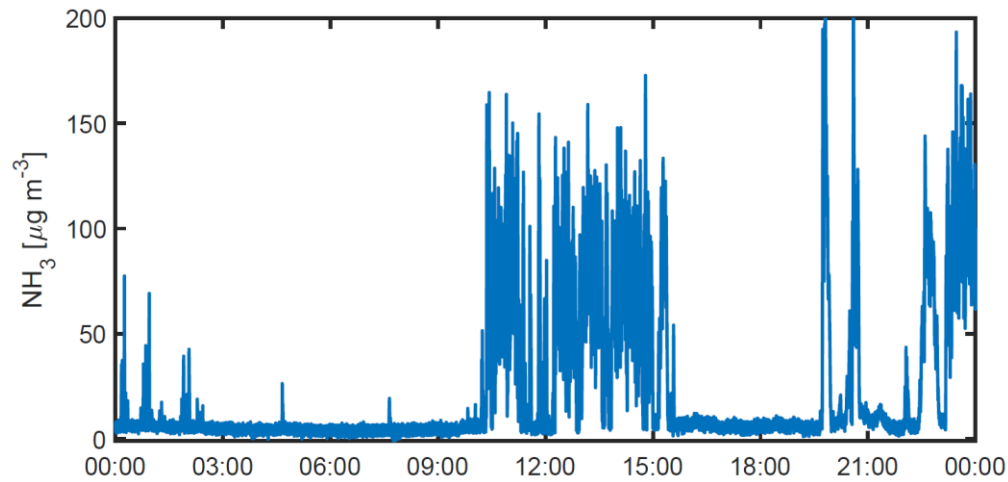
Methaanproductie uit mest is in ieder geval temperatuurafhankelijk, bij pensfermentatie is dat minder het geval.

Bij de boxmetingen kwam naar voren dat de gierafvoergaten in de stalvloer belangrijke bronnen zijn van methaan. Verlaging van deze emissie, mogelijk door betere afsluiting van de gieropsalg en afvang van methaan, kan daarom de totale emissie van de stal verder verlagen.

3.4 Mini-DOAS

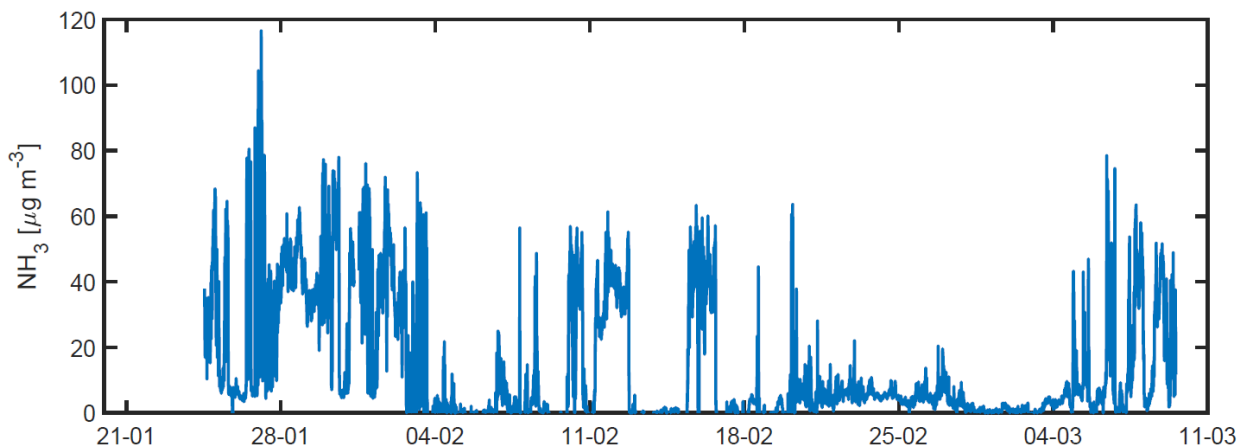
De mini-DOAS heeft vanaf 24 januari tot en met 9 maart 2018 naast de Kwatrijnstal gestaan. Over deze gehele periode is met een tijdsresolutie van één meting per seconde data verzameld. In Figuur 13 zijn de metingen te zien gemeten op 26 januari (tijdens de meetcampagne met ook pluimmetingen). Hierbij valt op dat na 10:00 UTC (11:00 lokale tijd) er met name pieken in ammoniak worden gemeten. Dit wordt veroorzaakt doordat de wind op dit tijdstip over de stal waait (van oost over zuid naar noordwest). Wat verder opvalt is dat er zeer scherpe pieken worden gemeten van soms slechts ~30 s. Dit is een groot voordeel van de mini-DOAS techniek ten opzichte

van nat-chemische methodes waar een scherpe piek soms wel enkele uren invloed kan hebben op het signaal.



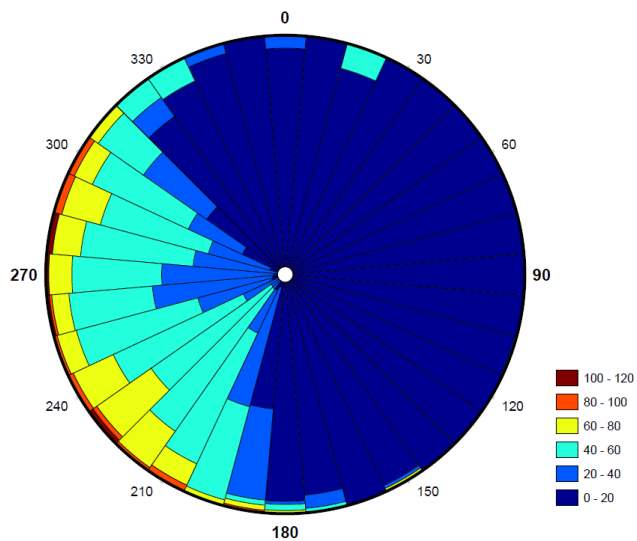
Figuur 13: Tijdserie (met tijd in UTC) van de ammoniakconcentratie gemeten met de mini-DOAS nabij de Kwatrijnstal op 26-1-2018.

De gehele tijdsserie van ammoniak over de meetperiode is, gemiddeld over 10 minuten, zichtbaar in Figuur 14. Gedurende deze tijd zijn verschillende pluimen van ammoniak zichtbaar. Om inzichtelijk te krijgen waar deze pluimen vandaan komen is ook de windrichting gemeten gedurende dezelfde periode (helaas zijn er in verband met een storing aan de meteomast geen gegevens over de gehele meetperiode).



Figuur 14: Tijdserie van 10 minuten gemiddelde ammoniakconcentraties, gemeten met de mini-DOAS nabij de Kwatrijnstal.

Een histogram van de ammoniakconcentratie uit de verschillende windrichtingen is geplott in Figuur 15. De verhoogde ammoniakconcentraties ($>40 \mu\text{g m}^{-3}$) worden gemeten wanneer de wind vanuit de Kwatrijnstal waait (westenwind). Vanuit de oostkant worden ammoniakconcentraties tussen de 0 en $20 \mu\text{g m}^{-3}$ waargenomen. Ook vanuit het zuidwesten worden verhoogde concentraties waargenomen. Deze zullen deels vanuit de Kwatrijnstal afkomstig zijn, maar mogelijk ook vanuit een boerderij aan de Roestelbergseweg op ongeveer 400 m afstand van de mini-DOAS.



Figuur 15: Histogram van de ammoniakconcentratie geobserveerd vanuit de verschillende windrichtingen (links). Overzicht van de omgeving van de Kwatrijnstal met in rood aangegeven het mini-DOAS pad (rechts).

De pluimen van ammoniakconcentratie gemeten met de mini-DOAS kunnen teruggerekend worden naar emissies van ammoniak uit de Kwatrijnstal. Hiervoor kan een Gausisch pluimmodel gebruikt worden. Binnen de omvang van dit project was dit echter niet mogelijk.

4 Discussie en conclusies

4.1 Ammoniakemissies van de stal

Met de pluimmetingen is binnen deze oriënterende meetcampagne de ammoniakemissie van de Kwatrijnstal op één meetdag bepaald. Vanwege de korte meetperiode kunnen de resultaten alleen met het nodige voorbehoud vergeleken worden met waardes die volgens het RAV-protocol verkregen zijn. Er is geprobeerd om de emissie van de Kwatrijnstal in een breder perspectief te plaatsen en daarmee de geldigheid daarvan te kunnen beoordelen door metingen aan een referentiestal. Daarnaast zijn met continue metingen met de mini-DOAS gedurende een aantal weken uitgevoerd, maar deze dataset kon binnen het bestek van deze opdracht niet meer worden uitgewerkt.

De pluimmetingen aan de referentiestal (conventionele roosters maar zoals de Kwatrijnstal ook een biologische bedrijfsvoering) zijn op dezelfde dag uitgevoerd, dus onder gelijke meteorologische omstandigheden. Beperking van de vergelijking was dat er in de Kwatrijnstal Jerseykoeien lopen en in de referentiestal HF-koeien. Beide rassen verschillen sterk in gewicht en melkproductie. RAV-emissiewaardes worden berekend op grond van dier(plaats), maar vanwege het grote verschil in gewicht tussen Jersey en HF-koeien (Tabel 3) is gezocht naar een maat voor de ammoniakemissie die daar minder van afhangt. Daarom is de ammoniakemissie niet alleen per aanwezig dier ouder dan 2 jaar berekend, maar ook per kg melk. Hierbij is de “vet en eiwit gecorrigeerde melkproductie” (FPCM) gebruikt omdat Jersey melk veel hogere vet en eiwitpercentages heeft dan melk van HF-koeien. Zowel uitgedrukt per aanwezig dier > 2 jaar als per kg FPCM was de emissie in de Kwatrijnstal fors lager dan die in de referentiestal. Een ander ijkpunt is de vergelijking tussen de referentiestal en de RAV-waarde (categorie A 1.100). Hier moet opgemerkt worden dat het verschil in leegstand (Tabel 1) mogelijk de vergelijking iets scheeftrekt: het RAV-getal is bij maximaal 10% leegstand gemeten, terwijl de leegstand tijdens de meetdag in de referentiestal 17% en in de Kwatrijnstal zelfs 24%. Echter, minder leegstand zal naar verwachting de emissie per dier of per kg melk juist verlagen omdat de emissie voor een groot deel afhangt van het besmeurde oppervlak, dat niet verandert, maar vervolgens door een groter aantal dieren (of totale melkproductie) wordt gedeeld. Dit betekent dat de hier gepresenteerde waardes mogelijk een overschatting zijn van de emissie als deze gemeten zou zijn volgens het RAV-protocol.

De gemeten emissie van de referentiestal was per dier iets lager, maar per kg FPCM juist iets hoger dan de “RAV”-emissie (Tabel 10). Dit verschil per FPCM is het gevolg van de lagere melkproductie in de biologische stal (Tabel 3) ten opzichte van de RAV waarde op basis van een gangbare stal. Hiermee lijken de waardes van de referentiestal goed vergelijkbaar met die van de RAV, waardoor de waardes van de Kwatrijnstal ook met die van de RAV lijken te kunnen worden vergeleken. We concluderen daarom dat de ammoniakemissie van de Kwatrijnstal op de meetdagen lager was dan die van zowel de referentiestal als van de RAV-waarde. Hierbij geldt echter nog steeds het voorbehoud dat er met meerdere meetdagen een andere gemiddelde emissie en conclusie uit kan komen. Een punt van aandacht bij eventuele latere metingen is om de leegstand beperkt worden tot maximaal 10% (aantal koeien > 2 jaar).

4.2 Mogelijkheden voor verdere beperking van de ammoniakemissie van de Kwatrijnstal

De Kwatrijnstal als geheel had tijdens de meetdagen een lagere ammoniakemissie dan de referentiestal. Desondanks geven de metingen aanknopingspunten voor verdere verlaging van de emissie:

- Uit de boxmetingen op de stalvloer blijkt duidelijk dat er plaatselijk grote verschillen in emissies plaatsvinden (factor 20-40). De ammoniakemissie was sterk gekoppeld aan de hoeveelheid mest en urine op de vloer. Hiermee is het vaker laten langsgaan van een mestrobot een rechtstreekse maatregel om de emissie te verlagen.
- Uit de wetenschappelijke literatuur blijkt dat scheiding van mest en urine vlak na excretie, zoals in de Kwatrijnstal gebeurt, enkel een vertraging geeft van de omzetting van ureum in ammonium in de gierfractie van 4 dagen (bij 20 °C) (Vaddella et al., 2010; Whitehead and Raistrick, 1993). De gemiddelde opslagtijd is veel langer. Dit betekent dat ook in de Kwatrijnstal, in de gier alle ureum in ammonium is omgezet. Dit is bevestigd door de analyses van de gier met een hoog aandeel TAN (Tabel 4). Dit betekent dat bij de gieropslag de aandacht uit moet gaan naar het voorkomen van vervluchtiging van opgeloste ammonium. Dit kan door bijvoorbeeld door (Bussink and Oenema, 1998; Erisman, 2000; Muck, 1982):
 - Betere afsluiting van de opslag
 - Meer verdunning met water
 - Lage temperatuur (dus: vroeg uitrijden in het voorjaar)
 - Verlaging van pH
- Wat betreft de vaste mest blijkt uit de literatuur dat omzetting van de organisch gebonden N in ammonium een traag proces is (Monteny and Erisman, 1998; Whitehead and Raistrick, 1993). Hieruit zou kunnen worden geconcludeerd dat de vaste mestopslag geen grote bron van ammoniak zou moeten zijn. Dit is bevestigd door de boxmeting op de mesthoop (Tabel 7).

4.3 Ammoniakemissie bij uitrijden

Een mogelijk nadeel van technieken die de stalemissies beperken is dat de vastgehouden ammoniak, bij uitrijden van de mest alsnog emitteert. Om dit – oriënterend – te toetsen zijn de metingen bij simulatie van uitrijden van de Kwatrijnmest uitgevoerd, in vergelijking met drijfmest uit de referentiestal in windtunnels. Zowel de mestanalyses als de emissiemetingen geven geen aanleiding om te concluderen dat de emissies hoger zijn bij de Kwatrijnstal: de aangebrachte ammoniakale N (TAN) was lager en de emissie tijdens de eerste paar uur na aanwending was gelijk. Door het verschil in aanwending en daardoor in emissieproces tussen drijfmest, vaste mest en gier zou het zinvol zijn om de metingen te herhalen over een langere meetperiode (bijvoorbeeld 96 uur): de verwachting is dat er dan verschillen optreden in het voordeel van de Kwatrijnmest. In een eventueel vervolgsessie zal beter moeten worden gekeken naar de werkelijke verhoudingen in hoeveelheden geproduceerde en aangewende mest (drijfmest, vaste mest, gier) voor een betere vergelijking.

Op grond van onze relatief korte metingen concluderen we dat de emissie bij uitrijden van Kwatrijnmest gelijk is aan die van drijfmest. Dit in tegenstelling tot de verwachting dat door het scheiden van vaste mest en urine aan de bron, de hoeveelheid TAN, en daardoor ook de emissie bij uitrijden, lager zou zijn. Zoals in paragraaf 4.2 aangegeven, wordt ureum ook bij gescheiden opvang

volledig omgezet zodat de TAN-gehalte in de gier hoog is (Tabel 4). Dit verklaart de gemeten emissies bij gesimuleerde aanwending.

Doordat de gier en vaste mest van de Kwatrijnstal apart worden uitgereden kan de emissie mogelijk relatief eenvoudig worden gereduceerd om alsnog lager uit te komen dan bij drijfmest. Er is relatief gemakkelijk winst te behalen bij uitrijden van de gier. Aanbeveling is om deze in het voorjaar uit te rijden bij koude temperaturen, omdat emissie een temperatuurafhankelijk proces is (Lockyer and Whitehead, 1990). Hier moet wel een juiste balans gevonden met het moment waarop de N opname door gras al hoog genoeg om nitraatuitspoeling (na nitrificatie van ammonium in de bodem) te beperken. Ook kan de gier verdund worden met water (Monteny and Erisman, 1998). Om de emissie te reduceren zou daarnaast de aanwending emissiearm kunnen gebeuren: wanneer de gier op of in de grond wordt geplaatst, met een sleepvoet of zodebemester, en niet op het gras zelf, is het emitterend oppervlak veel kleiner.

Referenties

- Bannink, A., Valk, H., Van Vuuren, A.M., 1999. Intake and Excretion of Sodium, Potassium, and Nitrogen and the Effects on Urine Production by Lactating Dairy Cows. *Journal of Dairy Science* 82, 1008–1018. doi:10.3168/jds.S0022-0302(99)75321-X
- Bos, B., 2012. Dierenwelzijn en milieu samen in Kwatrijn. *V-Focus* 24–26.
- Bussink, D.W., Oenema, O., 1998. Ammonia volatilization from dairy farming systems in temperate areas: a review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 51, 19–33. doi:10.1023/A:1009747109538
- Erisman, J.W., 2000. *De vliegende geest: ammoniak uit de landbouw en de gevolgen voor de natuur*. BetaText Bergen, The Netherlands.
- Hensen, A., Scharff, H., 2001: Methane emission estimates from landfills obtained with dynamic plume measurements, *Water, Air and Soil pollution*, Kluwer, focus1: 455-464.
- Hensen, A., Groot, T.T., Van Den Bulk, W.C.M., Vermeulen, A.T., Olesen, J.E., Schelde, K. Dairy farm CH₄ and N₂O emissions, from one square metre to the full farm scale (2006) *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 112 (2-3), pp. 146-152.
- Lockyer, D.R., Whitehead, D.C., 1990. Volatilization of ammonia from cattle urine applied to grassland. *Soil Biology and Biochemistry* 22, 1137–1142. doi:10.1016/0038-0717(90)90040-7
- Monteny, G.J., Erisman, J.W., 1998. Ammonia emission from dairy cow buildings: a review of measurement techniques, influencing factors and possibilities for reduction. *NJAS Wageningen Journal of Life Sciences* 225–247.
- Muck, R.E., 1982. Urease Activity in Bovine Feces. *Journal of Dairy Science* 65, 7.
- Ogink, N.W.M., Groenestein, C.M., Mosquera, J., 2014. Actualisering ammoniakemissiefactoren rundvee: advies voor aanpassing in de Regeling ammoniak en veehouderij (No. 744). Wageningen Livestock Research, Wageningen.
- Vaddella, V.K., Ndegwa, P.M., Joo, H.S., Ullman, J.L., 2010. Impact of Separating Dairy Cattle Excretions on Ammonia Emissions. *Journal of Environmental Quality* 39, 1807–1812. doi:10.2134/jeq2009.0266
- Volten, H., J. B. Bergwerff, M. Haaima, D. E. Lolkema, A. J. C. Berkhout, G. R. Hoff, C. J. M. Potma, R.J. Wichink Kruit, W. A. J. Van Pul, and D. P. J. Swart, 2012. Two instruments based on differential optical absorption spectroscopy (DOAS) to measure accurate ammonia concentrations in the atmosphere. *Atmospheric Measurement Techniques*, 5.2 413-427.
- Whitehead, D.C., Raistrick, N., 1993. Nitrogen in the excreta of dairy cattle: changes during short-term storage. *The Journal of Agricultural Science* 121, 73. doi:10.1017/S0021859600076814