



StalSens-Oren: meetsystemen voor bedrijfs-monitoring van emissies in de veehouderij

Hilko Ellen, Daniëlle van Dinther, Roland Melse, Julio Mosquera, Nico Ogink, Johan Ploegaert, Jan Vonk



WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH

StalSens-Oren: meetsystemen voor bedrijfs-monitoring van emissies in de veehouderij

Deskstudie naar de mogelijkheden voor directe emissieregistratie

Hilko Ellen¹, Daniëlle van Dinther², Roland Melse¹, Julio Mosquera¹, Nico Ogink¹, Johan Ploegaert¹, Jan Vonk³

¹ Wageningen Livestock Research (WLR)

² Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN)

³ Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM)

Wageningen Livestock Research
Wageningen, april 2018

Rapport 1099

Ellen, H., D. van Dinther, R. Melse, J. Mosquera, N. Ogink, J.P.M. Ploegaert, J. Vonk. 2018. *StalSens-Oren: meetsystemen voor bedrijfsmonitoring van emissies in de veehouderij. Deskstudie naar de mogelijkheden voor directe emissieregistratie*. Wageningen Livestock Research, Rapport 1099.

Samenvatting NL

In de regulering van emissies van ammoniak, fijnstof en geur vanuit stallen in de veehouderij zijn emissiefactoren opgenomen gebaseerd op metingen aan systemen volgens een meetprotocol, waarbij de bedrijven worden beoordeeld op de aanwezigheid van de systemen voor het verkrijgen van een vergunning. Een alternatieve benadering is te reguleren op basis van directe continue bedrijfsmonitoring van emissies waarbij de veehouder zelf stuurt op het voldoen aan een vastgestelde emissie-eis. Deze aanpak vraagt de ontwikkeling van een deugdelijk en betaalbaar bedrijfsmonitoringssysteem. Dit rapport gaat in op de technische mogelijkheden en perspectieven voor ontwikkeling, en geeft een overzicht van de eisen waaraan een meetsysteem voor het vastleggen van de emissies zou moeten voldoen.

Summary UK

Regulations on emissions of ammonia, fine dust and odour from livestock barns are based on emission factors of specified housing systems derived from field testing programmes of prototypes. Compliance with emission regulations is verified by inspection on the presence of specified housing systems on farms. An alternative regulatory approach is to rely on a farm based monitoring system that allows farmers to comply with a specified emission target by mitigation measures of their own choice. To enable this approach the development of a reliable and cost affordable farm monitoring system is needed. This report provides an overview of current technical options and perspectives for development, as well as a list of requirements that farm monitoring systems for emissions would need to meet.

Dit rapport is gratis te downloaden op <https://doi.org/10.18174/448129> of op www.wur.nl/livestock-research (onder Wageningen Livestock Research publicaties).

© 2018 Wageningen Livestock Research

Postbus 338, 6700 AH Wageningen, T 0317 48 39 53, E info.livestockresearch@wur.nl, www.wur.nl/livestock-research. Wageningen Livestock Research is onderdeel van Wageningen University & Research.

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

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt worden door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke wijze dan ook zonder voorafgaande toestemming van de uitgever of auteur.



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 gedeponereerd bij de Arrondissementsrechtbank Zwolle.

Inhoud

	Woord vooraf	5
	Samenvatting	7
1	Inleiding	9
	1.1 Aanleiding	9
	1.2 Doelstellingen	10
	1.3 Onderzoeksvragen	10
	1.4 Leeswijzer	10
2	Overzicht meetprincipes	11
	2.1 Algemeen	11
	2.2 Concentratie metingen	11
	2.2.1 Lichtverstrooiing	11
	2.2.2 Inductie	12
	2.2.3 Metaaloxides	12
	2.2.4 Elektrochemisch	12
	2.2.5 Infrarood	12
	2.2.6 Foto ionisatie detector	13
	2.3 Debietmetingen	13
	2.3.1 Pulsenteller/toerentalmeting	13
	2.3.2 Drukverschil	13
	2.3.3 Bepaling via CO ₂ -massabalans	13
	2.4 Omgevingsvariabelen	14
	2.4.1 Weerstandsvaerandering	14
3	Prestatiekenmerken sensoren	15
4	Beschikbare sensoren	18
	4.1 Concentratie metingen	18
	4.1.1 Ammoniak	18
	4.1.2 Geur	18
	4.1.3 Fijnstof	19
	4.1.4 Koolstofdioxide	20
	4.2 Omgevingsparameters en productiekenmerken	20
	4.3 Onderzoeklijnen en toekomstige ontwikkelingen	22
5	Huisvestingssystemen en gemeten concentraties	23
	5.1 Huisvestingssystemen en management	23
	5.2 Overzicht gemeten concentraties	24
6	Programma van eisen	29
	6.1 Prestatiekenmerken	29
	6.2 Registratie	32
	6.3 Randapparatuur	33
	6.4 Validatieprotocol meetsysteem	34
7	Antwoorden op de vragen	35
	Literatuur	37

Woord vooraf

De emissies van ammoniak en geur zijn al jarenlang belangrijke onderwerpen binnen de veehouderij. Daaraan is afgelopen jaren de emissie van fijnstof (PM₁₀) toegevoegd. Om de emissies terug te dringen is via regelgeving voorgeschreven dat bedrijven technische maatregelen moeten toepassen in de stallen. Op basis van metingen zijn daarbij de emissiefactoren van deze technieken vastgelegd. Er zijn ook managementmaatregelen waarmee de emissies zijn terug te dringen. De inzet daarvan zal echter per bedrijf een andere emissie geven. Om de veehouder meer vrijheid te geven in welke maatregelen en combinaties van maatregelen worden toegepast om de emissies te beperken, zou een aanpak gebaseerd op het voldoen aan een emissie-eis middels continue bedrijfsregistratie van emissies voordelen bieden. In dit rapport wordt een eerste inventarisatie gedaan van eisen aan meettechnieken die nodig zijn om een betrouwbaar meetsysteem op te kunnen zetten voor deze continue registratie.

Dit rapport is tot stand gekomen via een nauwe samenwerking tussen het Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN), Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM) en Wageningen Livestock Research, met financiering vanuit de pluimveesector en het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. Wij willen alle betrokkenen bedanken voor hun bijdrage aan deze inventarisatie.

Hilko Ellen
Projectleider

Samenvatting

In de veehouderij wordt gestreefd naar het ontwikkelen van bedrijfssystemen en managementmaatregelen die de uitstoot van geur, ammoniak, (fijn-)stof en alle daaraan verbonden componenten drastisch terugbrengen. De huidige regulering voor stalemissies uit de veehouderij is gebaseerd op specifiek omschreven emissiearme bedrijfssystemen met vastgestelde algemene emissiefactoren in de verschillende regelgevingen. Een aantrekkelijk alternatief voor deze zogenoemde middelvoorschriften-regelgeving, is een opzet via doelvoorschriften waarbinnen emissiearme technieken flexibeler kunnen worden ingezet en snellere innovatie met minder kosten mogelijk is. Voorwaarde voor deze aanpak is dat een betrouwbaar systeem van directe emissieregistratie via bedrijfsmonitoring aantoont of doelvoorschriften worden nageleefd. Om de kansen van een regelsysteem via directe emissieregistratie in beeld te brengen is er behoefte aan een verkenning van de stand van de techniek rond bedrijfsmonitoring en te verwachten ontwikkelingen.

Het doel van deze studie was een verkenning uit te voeren naar de stand van de techniek van meetsensoren voor directe registratie van de stalemissies uit de veehouderij, in de vorm van ammoniak, fijnstof en geur. Koolstofdioxide wordt hierin eveneens meegenomen, omdat deze vaak als (natuurlijke) tracer gebruikt wordt om de verversingsgraad van de stalruimte vast te stellen. Verder wordt aandacht besteed aan de directe meting van de ventilatiehoeveelheid en omgevingsparameters als temperatuur en relatieve vochtigheid (RV). De hiervoor beschikbare meetprincipes worden toegelicht in hoofdstuk 2, samen met enkele reeds in de veehouderij toegepaste meetprincipes. Hoofdstuk 3 geeft weer welke prestatiekenmerken een rol spelen bij het meten van concentraties met behulp van sensoren, waarna in hoofdstuk 4 een overzicht wordt gegeven van beschikbare sensoren. De invloedfactoren vanuit de verschillende huisvestingssystemen in de veehouderij op het meten van emissies worden kort besproken in hoofdstuk 5, samen met een overzicht van gemeten concentraties bij diverse onderzoeken naar emissies. Op basis van de eerdere hoofdstukken wordt in hoofdstuk 6 een programma van eisen voor meetsystemen beschreven.

De doelstelling is vertaald in een aantal onderzoeksvragen die op basis van de informatie in hoofdstukken 2 t/m 6 als volgt zijn beantwoord:

1. *Welke technische eisen moeten er gesteld worden aan een volledig meetsysteem voor stalemissie op een praktijkbedrijf en welke eisen aan de hierin opgenomen meetsensoren en randapparatuur?*
De metingen dienen betrouwbare resultaten op te leveren op basis waarvan veehouder en controlerende instantie inzicht krijgen in het niveau en het verloop van de emissie in verhouding tot de in de vergunning vastgelegde maximale waarde. Voorwaarden daarbij zijn dat het meetsysteem zelfstandig functioneert en beperkt gevoelig is voor verstoringen van buitenaf (zoals vervuiling en stroomuitval). Het meetbereik van de sensoren zal voldoende moeten zijn om concentraties gedurende minimaal 95% van de monitoringstijd te kunnen meten (zie hoofdstuk 5.2) en de randapparatuur zal vooral moeten zorgen voor een veilige opslag van de gemeten data. Benodigd toezicht op drift-risico's van het betreffende meetsysteem, frequenties van herkalibraties en onderhoudseisen dienen omschreven te zijn. Om te kunnen garanderen dat het meetsysteem voor bedrijfsmonitoring hieraan voldoet wordt aanbevolen een validatieprotocol te ontwikkelen geënt op de benadering die in het RVO-validatieprotocol voor NH₃-meetmethoden is uitgewerkt.
2. *Welke meetsensoren zijn momenteel beschikbaar voor concentratiemetingen: ammoniak (NH₃), fijnstof (PM₁₀ en PM_{2,5}), geur en koolstofdioxide (CO₂)?*
Uit de inventarisatie in deze studie komt naar voren dat er voor NH₃ en CO₂ al sensoren beschikbaar zijn voor toepassing in de stal, die perspectiefvol zijn voor inzet in een bedrijfsmonitoringssysteem. Voor NH₃ zijn (nog) geen sensoren beschikbaar voor buitenluchtmetingen. De 0 ppm als onderkant van het meetbereik die vaak wordt aangegeven door de fabrikanten is niet realistisch en scheidt geen duidelijkheid over de detectiegrens van de sensor. Voor CO₂ zijn wel sensoren beschikbaar die de concentratie buiten nauwkeurig kunnen meten. Sensoren voor langdurige continue meting van PM₁₀-concentratie hebben nog problemen met vervuiling bij hoge concentraties zoals in pluimveestallen. Voor geur is de uitdaging geschikte

proxy-gassen per diercategorie vast te stellen, die een goede afspiegeling zijn van de vrijkomende geur in de betreffende situatie.

3. *Welke aanvullende technische randapparatuur is momenteel beschikbaar voor een bedrijfsmeetsysteem?*

De belangrijkste factor in deze is het betrouwbaar opslaan van de gemeten waarden. Hiervoor zijn goede loggers beschikbaar. Daarnaast ook het voorkomen van dataverlies door stroomuitval. Ook hiervoor zijn betaalbare oplossingen aanwezig.

4. *In hoeverre voldoen de geïnventariseerde meetsensoren en technische randapparatuur aan het programma van eisen van een meetsysteem voor stalemissie en in welke onderdelen van het programma van eisen wordt momenteel niet voorzien?*

Veel van de genoemde sensoren zullen kunnen voldoen aan de eisen die worden gesteld. Ook randapparatuur zal kunnen voldoen. Belangrijker is echter dat het complete meetsysteem betrouwbare informatie levert. Hiervoor zal het monitoringssysteem integraal moeten worden gevalideerd tegen een referentie-systeem.

5. *Welke bedrijfsmeetsystemen zijn met beschikbare meetsensoren en randapparatuur op korte termijn realiseerbaar?*

Op basis van de in deze studie verzamelde informatie blijkt dat er nog geen compleet meetsysteem beschikbaar is voor toepassing op stalniveau of bedrijfsniveau. De verwachting is dat dergelijke systemen voor meting van NH₃-verwijderingsrendementen van luchtwassers op korte termijn (ca. 1-2 jaar), en NH₃-emissies uit mechanische geventileerde pluimvee- en varkenstallen op middellange termijn (ca. 2-3 jaar) beschikbaar kunnen zijn. Toepassing in natuurlijk geventileerde stallen wordt eveneens realiseerbaar geacht maar vraagt een complexer systeem en daarmee meer tijd voor ontwikkeling en validatie met referentie-methodes. Complete meetsystemen voor het meten van de emissies van fijnstof (PM₁₀ en PM_{2,5}) laten nog wat langer op zicht wachten. Matschappelijke en/of politieke druk om de emissie van fijnstof verder terug te dringen kan hier echter mogelijk zorgen voor een versnelling. Dit laatste geldt ook voor andere emissies.

Voor geur zullen eerst goede proxy-gassen moeten worden gevonden die in het veld meetbaar zijn. Hiervoor is fundamenteel onderzoek naar de relatie tussen geurconcentratie (volgens sensorische meetmethode) en geurcomponenten noodzakelijk. Pas wanneer deze zijn vastgelegd voor de verschillende sectoren, zal het ontwikkelen van een compleet meetsysteem mogelijk worden.

6. *Welke technische ontwikkelingen zijn noodzakelijk om tekortkomingen in het programma van eisen op te lossen, welke zijn hierbij perspectiefvol, en wat zijn de aanbevelingen voor het ondersteunen en versnellen van perspectievolle ontwikkelingen?*

Om te komen tot betrouwbare meetsystemen is het belangrijkste element te zorgen dat er een validatieprotocol wordt ontwikkeld, waarmee richting ontwikkelaars duidelijke voorwaarden voor prestatie-eisen worden vastgelegd. Systemen getest volgens dit protocol zijn dan in staat betrouwbare informatie over de geregistreerde emissies te genereren. Ontwikkelingen kunnen verder versneld worden door het uitzetten van pilot-systemen in de verschillende diercategorieën waarmee door veehouders en toezichthouders ervaring kan worden opgedaan. De meetnauwkeurigheid, kwaliteitsborging en onderhoudsschema's kunnen binnen deze pilots worden getoetst. Lessen hieruit kunnen worden benut voor grootschalige toepassing van bedrijfsmonitoring.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

In de veehouderij wordt gestreefd naar het ontwikkelen van bedrijfssystemen en managementmaatregelen die de uitstoot van geur, ammoniak, (fijn-)stof en alle daaraan verbonden componenten drastisch terugbrengen. De werkwijze in de huidige regulering voor stalemissies uit de veehouderij is gebaseerd op specifiek omschreven emissiearme bedrijfssystemen met vastgestelde algemene emissiefactoren in de verschillende regelgevingen (zoals bv. in de 'Regeling ammoniak en veehouderij' en de 'Regeling geurhinder en veehouderij'). Deze aanpak kent een aantal nadelen die door meerdere betrokken partijen als innovatie-remmend worden beschouwd. De nadelen hebben betrekking op onder meer:

- de lange doorlooptijd van start innovatie tot het moment van opname in de regelgeving via plaatsing op de lijst met beschikbare emissiearme systemen;
- het principe dat elk in de regeling opgenomen emissiearm-systeem door elke producent geleverd kan worden, zolang voldaan wordt aan de systeembeschrijving in de regeling, waardoor de prikkel voor individuele bedrijven om te investeren in innovatieve technieken en metingen voor een emissiefactor wordt afgeremd¹;
- de relatieve starheid van het systeem qua combineren van stal- en managementmaatregelen;
- het ontbreken van stimulans en verantwoordelijkheid op bedrijfsniveau om emissiearme systemen optimaal te laten functioneren.

Deze nadelen zijn hoofdzakelijk terug te voeren op het zogenoemde 'middelvoorschriften'-karakter van de huidige regelingsaanpak. Een alternatief voor deze aanpak is een omslag naar een regeling gebaseerd op 'doelvoorschriften'-aanpak in de vorm van directe emissieregistratie. Bij deze werkwijze wordt gereguleerd op basis van een afgesproken emissiedoel dat op bedrijfsniveau via een permanent meetsysteem wordt gevolgd. Vanaf de ontwikkeling van het stelsel van vastgestelde emissiefactoren in de jaren negentig is deze aanpak als een aantrekkelijk alternatief veelvuldig naar voren gebracht, maar ook als telkens onhaalbaar beoordeeld door het ontbreken van geschikte en betaalbare meetapparatuur.

Met recente ontwikkelingen op het gebied van meetsensoren zijn de technische mogelijkheden voor de realisatie van deze aanpak tegen aanvaardbare kosten echter veel dichterbij gekomen, met name voor ammoniak- en fijnstofemissie. Deze aanpak levert potentieel belangrijke voordelen:

- Iedere ondernemer kan volledig naar eigen inzicht emissie reducerende maatregelen via stalaanpassing en managementmaatregelen doorvoeren die het best bij het eigen bedrijf passen, zonder daarbij binnen de randvoorwaarden van middelvoorschriften te hoeven blijven.
- Innovatie in emissiearme technieken hoeft niet noodzakelijkerwijs meer via een middelvoorschrift-lijst te lopen. Via de doelvoorschrift-route is kennis eigendom beter beschermd en zal er meer stimulans voor investering in innovatieve technieken zijn.
- Technieken kunnen sneller en met minder kosten ontwikkeld worden omdat er geen tijd nodig is voor meten en vaststellen van emissiefactoren. Nationale en regionale emissiereductie-doelen kunnen daardoor sneller worden gehaald.
- De verantwoordelijkheid van ondernemers om te voldoen aan de voorschriften van een emissiearm systeem is omgezet in een verantwoordelijkheid een gegeven emissie-niveau niet te overschrijden. Maatregelen worden hierdoor veel effectiever uitgevoerd. Afnemers van emissiearme technieken zullen leveranciers aanspreken op voldoende kwaliteit om benodigde prestatieniveaus te halen.
- Doelmatige handhaving door vergunningverlenende overheden wordt vereenvoudigd doordat de benodigde informatie via het bedrijfsmonitoringssysteem kan worden aangeleverd.

Deze aanpak brengt ook risico's met zich mee die bij de technische ontwikkeling en implementatie moeten worden meegenomen. Deze risico's hebben betrekking op onvoldoende technische betrouwbaarheid en nauwkeurigheid van meetsystemen, fraudegevoeligheid, gebrekkig onderhoud en robuustheid. Veel hangt daarom af van wat de technische mogelijkheden van beschikbare

¹ Vanwege opmerkingen over deze problematiek door leveranciers van technieken, is vanuit het Ministerie van I&W een traject gestart om de opname van technieken in de Nederlandse regelgeving aan te passen. Het is de bedoeling om daarbij de leverancier van de technieken meer bescherming van de innovatie te bieden. Zie brief aan de Tweede Kamer van 21 juni 2017 m.b.t. aanpassingen stalbeoordeling TacRav.

meetsensoren zijn en wat te verwachten valt van de ontwikkelingen op dit terrein. Om de kansen van een aanpak gebaseerd op doelvoorschriften via directe emissieregistratie in beeld te brengen is er behoefte aan een verkenning van de stand van de techniek en te verwachten ontwikkelingen.

1.2 Doelstellingen

Het doel van deze studie was een verkenning uit te voeren naar de stand van de techniek van meetsensoren voor directe registratie van de stalemissies uit de veehouderij², in de vorm van ammoniak, fijnstof en geur. Koolstofdioxide wordt eveneens meegenomen, omdat deze vaak als (natuurlijke) tracer gebruikt wordt om de verversingsgraad van de stalruimte vast te stellen. Verder wordt aandacht besteed aan de directe meting van de ventilatiehoeveelheid en omgevingsparameters als temperatuur en relatieve vochtigheid (RV). Deze laatste twee parameters kunnen een rol spelen in de aansturing van de klimaatbeheersing en/of zijn benodigd voor het corrigeren van de door sensoren gemeten concentraties. Naast de huidige stand van de techniek is het doel de te verwachten ontwikkelingen op korte en lange termijn in beeld te brengen, om daarmee het perspectief voor directe emissieregistratie op bedrijfsniveau te kunnen vaststellen.

1.3 Onderzoeksvragen

Voor het bereiken van de doelstellingen zijn de volgende onderzoeksvragen geformuleerd:

1. Welke technische eisen moeten er gesteld worden aan een volledig meetsysteem voor stalemissie op een praktijkbedrijf en welke eisen aan de hierin opgenomen meetsensoren en randapparatuur?
2. Welke meetsensoren zijn momenteel beschikbaar voor concentratiemetingen: ammoniak (NH₃), fijnstof (PM₁₀ en PM_{2,5}), geur en koolstofdioxide (CO₂)?
3. Welke aanvullende technische randapparatuur is noodzakelijk en momenteel beschikbaar voor een bedrijfsmeetsysteem?
4. In hoeverre voldoen de geïnventariseerde meetsensoren en technische randapparatuur aan het programma van eisen van een meetsysteem voor stalemissie en in welke onderdelen wordt momenteel niet voorzien?
5. Welke bedrijfsmeetsystemen zijn met beschikbare meetsensoren en randapparatuur op korte termijn realiseerbaar?
6. Welke technische ontwikkelingen zijn noodzakelijk om tekortkomingen in het programma van eisen op te lossen, welke zijn hierbij perspectiefvol, en wat zijn de aanbevelingen voor het ondersteunen en versnellen van perspectiefvolle ontwikkelingen?

1.4 Leeswijzer

Voor het meten van concentraties in de lucht worden diverse meetprincipes toegepast. Deze meetprincipes worden toegelicht in hoofdstuk 2, samen met enkele andere in de veehouderij toegepaste meetprincipes. Hoofdstuk 3 geeft weer welke prestatiekenmerken een rol spelen bij het meten van concentraties met behulp van sensoren, waarna in hoofdstuk 4 een overzicht wordt gegeven van beschikbare sensoren. De invloedfactoren vanuit de verschillende huisvestingssystemen in de veehouderij op het meten van emissies worden kort besproken in hoofdstuk 5, samen met een overzicht van gemeten concentraties bij diverse onderzoeken naar emissies. Op basis van de eerdere hoofdstukken wordt in hoofdstuk 6 een programma van eisen voor meetsystemen beschreven. Hoofdstuk 7 ten slotte, geeft de antwoorden weer op de in paragraaf 1.3 gestelde onderzoeksvragen.

² Het project richt zich dus niet op het meten van emissies vanaf bijvoorbeeld vrije uitlopen of beweiding.

2 Overzicht meetprincipes

2.1 Algemeen

Dit project richt zich op stoffen waarvoor binnen de diverse wettelijke regelingen in de veehouderij (Regeling ammoniak en veehouderij (Rav), regeling geurhinder en veehouderij (Rgv), Regeling beoordeling luchtkwaliteit (fijnstof)) waarden zijn opgenomen. Het betreft hier dus ammoniak (NH₃), geur en fijnstof (PM₁₀ en PM_{2,5}). Tevens wordt koolstofdioxide (CO₂) besproken omdat deze als natuurlijke tracer gebruikt wordt bij het vaststellen van emissies uit natuurlijk geventileerde stallen. Waar NH₃, PM₁₀, PM_{2,5} en CO₂ direct in de stal gemeten kunnen worden, wordt de geuruitstoot in de huidige praktijk indirect via een sensorische methode gemeten. Geur uit stalgebouwen heeft een complexe samenstelling met veel componenten die lastig direct meetbaar zijn met chemisch-analytische methoden. Daarom wordt de geurconcentratie (uitgedrukt in de sensorische eenheid OUE/m³) in stalluchtmonsters door geurpanels in een laboratorium bepaald. Geur kan daarom bij directe meting aan de bron alleen op afgeleide wijze benaderd worden, bijvoorbeeld met sensoren voor vluchtige organische stoffen (VOS), waterstofsulfide (H₂S) of NH₃ als samenhang met geurbeleving.

In dit rapport wordt regelmatig de term 'sensor' gebruikt. Hiermee wordt in de engste betekenis van het woord het basiselement bedoeld dat een signaal afgeeft waaruit de concentratie van het te meten gas of stof wordt bepaald. Dit element is vaak onderdeel van een groter geheel. Zo heeft het element een stabiele voeding nodig en moet het signaal dat het element afgeeft (bv. een voltage) nog worden vertaald naar een af te lezen waarde. Hiervoor zijn andere, veelal elektronische, onderdelen nodig die samen met het element in een beschermende behuizing worden geplaatst. Het geheel (element, elektronische apparatuur voor omzetting signaal en beschermende behuizing) wordt in de praktijk vaak sensor genoemd. Als in deze behuizing ook de mogelijkheid aanwezig is om de waarde af te lezen, wordt het geheel doorgaans aangeduid als monitor. Een volwaardig meetsysteem voor de continue registratie van emissies bevat daarnaast een datalogger voor de opslag van alle benodigde informatie (naast concentraties ook ventilatiedebiet, kalibraties) en software voor het berekenen, uitlezen en inzichtelijk maken van de meetresultaten. De prijs van een sensor, of basiselement dat het signaal afgeeft, is daarmee een onderdeel van de prijs van het totale meetsysteem of monitor en daarmee niet bepalend voor de prijs van het geheel.

Voordat we de verschillende typen sensoren behandelen die op de markt zijn volgt eerst een kort overzicht van de verschillende meetprincipes van de sensoren. Fijnstof wordt over het algemeen met sensoren gemeten volgens een lichtverstrooiingsprincipe (optisch), hiernaast zijn er ook sensoren op de markt die gebruik maken van door stofdeeltjes veroorzaakte inductie. Verschillende soorten gas (waaronder NH₃, CO₂ en geurvormende gassen) kunnen met twee meetprincipes gemeten worden: metaaloxides en elektrochemisch. De CO₂-concentratie kan ook gemeten worden met infrarood sensoren. Vluchtige organische stoffen kunnen gemeten worden met een foto ionisatie detector. Grootheden als temperatuur en relatieve vochtigheid kunnen gemeten worden door middel van weerstandveranderingen. Hieronder volgt een uitleg van de verschillende meetprincipes. De sensortechnieken staan echter niet stil. Het is goed mogelijk dat fabrikanten ook andere meetprincipes toepassen. Sensoren worden steeds meer als black box verkocht, waardoor niet of lastig te achterhalen is welk meetprincipe gebruikt wordt.

2.2 Concentratiemetingen

2.2.1 Lichtverstrooiing

Sensoren voor fijnstof maken over het algemeen gebruik van de verstrooiing van licht veroorzaakt door de stofdeeltjes. Een lichtbron schijnt op lucht waar de fijnstofdeeltjes in zitten en de deeltjes zorgen voor verstrooiing van dit licht. Een fotodiode (over het algemeen een array aan diodes) vangt vervolgens het verstrooide licht op. De fotodiode wordt over het algemeen geplaatst onder een hoek van 45° van de lichtbron. Hoe groter een deeltje hoe langer het licht verstrooid zal worden naar de

fotodiodes en hoe meer deeltjes hoe vaker er licht verstrooid wordt. Hierdoor is dan ook uit het signaal van de fotodiode(s) de concentratie fijnstof te schatten.

2.2.2 Inductie

Er zijn ook enkele sensoren op de markt die gebruik maken van zogenoemde 'inductieve elektrificatie' om fijnstof te meten. Hierbij wordt lucht naar een geïsoleerde, geleidende meetkop geleid. Wanneer een stofdeeltje in contact komt met de meetkop, zorgt dit voor een lading. Deze lading wordt vervolgens versterkt en omgezet in een signaal die correleert met de fijnstofconcentratie (Sintrol website, bezocht 19-1-2018). Kalibratie op locatie waar de sensor ingezet wordt is nodig, aangezien het type fijnstof invloed heeft op het signaal.

2.2.3 Metaaloxides

De geleidbaarheid van metaaloxide verandert onder de invloed van absorptie en desorptie van een bepaald gas. Door de weerstand van de metaaloxide te meten is het dan ook mogelijk de concentratie van een bepaald gas te schatten. In de afgelopen tientallen jaren hebben nieuwe materialen en nieuwe fabricagemethodes het mogelijk gemaakt dat dit type sensoren betrouwbaarder en betaalbaarder werden (Williams, 1999). Grote voordelen van metaaloxidesensoren zijn de kleine maat (enkele millimeters), het geringe gewicht (paar gram), de korte reactietijd, lage detectielimiet en lage stroomconsumptie (Rai *et al.*, 2017). Het grootste nadeel van dit type sensor is dat de geleidbaarheid van de metaaloxide niet per definitie door één gas beïnvloed wordt. Hierdoor komt het voor dat de aanwezigheid van een ander gas en niet het doelgas de geleidbaarheid verandert, waardoor er een onjuiste concentratie van het doelgas wordt geschat (Fine *et al.*, 2010). Naast andere gassen kunnen metaaloxides ook beïnvloed worden door temperatuur en vochtigheid. Een ander nadeel is dat de responscurve niet lineair is (Wang *et al.*, 2010), wat de kalibratie van de metaaloxidesensoren bemoeilijkt.

2.2.4 Elektrochemisch

De meeste elektrochemische sensoren maken gebruik van de amperometrische methode (Engelse term: amperometric mode). Hierbij vindt er een elektrochemische reactie plaats tussen het doelgas en een elektrolyt waarbij een stroom ontstaat afhankelijk van de concentratie van het gas (Stetter en Li, 2008). De sensor bestaat over het algemeen uit drie elektrodes genaamd: de werk-, referentie- en tegenelektrode. In de werkelektrode vindt reductie of oxidatie plaats met het doelgas. De elektrische lading gegenereerd op de werkelektrode wordt gebalanceerd door een reactie in de tegenelektrode. Om lineariteit en gevoeligheid van de sensor te garanderen wordt de werkelektrode door middel van de referentie-elektrode op een bepaalde potentiaal gehouden. Het verschil tussen werk- en tegenelektrode genereert een stroom die gelinkt is aan de concentratie van het doelgas (Mead *et al.*, 2013). Voordelen ten opzichte van metaaloxide sensoren zouden zijn: lagere detectielimiet, lager stroomgebruik en minder gevoeligheid voor temperatuur, vochtigheid en andere gassen. Over het algemeen zijn elektrochemische sensoren groter en duurder dan de metaaloxide-sensoren (Rai *et al.*, 2017). Met het afnemen van de beschikbare hoeveelheid elektrolyt neemt ook de gevoeligheid af. Zeker in een omgeving met hoge en/of sterk variërende concentraties kan het aanbeveling verdienen de sensoren na een bepaald aantal 'draaiuren' (uitgedrukt als som van de over tijd gemeten concentraties) te vervangen. Dit zou per merk en type sensor proefondervindelijk vastgesteld moeten worden.

2.2.5 Infrarood

Infrarood sensoren meten volgens een optisch principe. Ze staan ook wel bekend als NDIR (Non-Dispersive Infra-Red) sensoren. Een lichtbundel wordt uitgezonden waarna gassen een deel van dit licht absorberen voordat het bij de detector aankomt. Een bepaald type gas absorbeert de straling van bepaalde golflengtes. De detector meet het spectrum van het licht, en door naar de hoogte van bepaalde pieken te kijken kan de concentratie van bepaalde gassen bepaald worden. Deze concentratie wordt verkregen met behulp van de wet van Beer-Lambert. De absorptiecoëfficiënt gebruikt in deze wet, is afhankelijk van de gasconcentratie en het absorptievermogen van het gas in

kwestie (Hodgkinson *et al.*, 2013). Vergeleken met metaaloxides en elektrochemische sensoren zijn infrarood sensoren duurder. Voordelen van infrarood sensoren zijn snelle reactiesnelheid (frequentie van 1 Hz), lange levensduur en lage stroomconsumptie (Gibson en MacGregor, 2013). Nadeel kan het optreden van kruisgevoeligheid met andere gassen zijn omdat absorptie in de gekozen golflengtes door meerdere gassen kunnen worden beïnvloed.

2.2.6 Foto ionisatie detector

Een foto ionisatie detector (FID of in het Engels: PID) zendt hoogenergetische fotonen uit die vluchtige organische componenten ioniseren. De gevormde ionen zorgen voor een stroom, die een maat vormt voor het totaal aan vluchtige organische stoffen. Iedere lamp met een ionisatiepotentiaal onder de 12 eV is in principe geschikt, omdat in schone omgevingslucht geen of nauwelijks componenten met een lager ionisatiepotentiaal voorkomen. Meest gangbaar is een lamp van 10,6 eV omdat deze gevoelig is voor de meeste stoffen. De output van een FID loopt van ppb-niveau tot duizenden ppm's, doorgaans lineair zelfs bij een mix aan meetbare gassen. Hiermee is gelijk ook het grootste nadeel van een FID gegeven: de sensor is verre van selectief.

2.3 Debietmetingen

Om de emissie te bepalen uit een stal is naast de concentratie van het gas of (fijn-)stof, ook het ventilatie-debiet nodig.

2.3.1 Pulsenteller/toerentalmeting

Voor het meten van het ventilatie-debiet wordt gebruik gemaakt van meetwaaiers of meetventilatoren waarvan het toerental een maat is voor het verplaatste debiet. Voor het opnemen van het toerental worden puls-opnemers gebruikt. Eén type werkt met een 'elektronisch oog': een lichtstraal wordt onderbroken door een schijfje met gaatjes op de rotoras. Een ander principe werkt met Hall-effect opnemers. Hierbij wordt de wisseling van een magnetisch veld gedetecteerd. De elektrische geleidbaarheid van een Hall-sensor verandert onder invloed van de magnetische flux. Op de as wordt een magneet, met op de omtrek Noord- en Zuidpolen, gemonteerd die bij rotatie pulsjes genereren. Ook bestaan er debietmeters met een stroomuitgang. Daarbij is een kleine dynamo aan de as gekoppeld. Deze geeft een geringe stroomsterkte afhankelijk van het toerental.

2.3.2 Drukverschil

Het debiet kan eveneens worden bepaald op basis van het drukverschil tussen twee ruimten. Voor druksensoren, ook in weegschalen, worden piëzokristallen gebruikt. Door het kristal te buigen ontstaat een spanningsverschil dat gerelateerd kan worden aan de mate van verbuigen. Hiermee kunnen nauwkeurige sensoren geproduceerd worden om de luchtdruk te meten.

2.3.3 Bepaling via CO₂-massabalans

Naast de hierboven genoemde mogelijkheden kan ook de zogenoemde 'CO₂-massabalans-methode' worden toegepast. Hierbij wordt de toename van CO₂-concentratie in stallucht, als gevolg van metabolisme, door meting van concentraties in de ingaande en uitgaande lucht vastgesteld. Op basis van een aantal productiekennmerken zoals het aantal aanwezige dieren, gewicht en voeropname (zie ook hoofdstuk 4) en fysiologische rekenregels kan de CO₂-productie per tijdseenheid worden geschat. Het debiet kan dan berekend worden door de geschatte CO₂-productie te delen door de gemeten toename van CO₂-concentratie. Deze methode wordt met name toegepast in natuurlijk geventileerde melkveestallen omdat hier meetventilatoren en drukverschil-sensoren door de grote luchtuitwisselingsvlakken niet betrouwbaar kunnen worden ingezet.

2.4 Omgevingsvariabelen

In stallen worden een aantal parameters vastgelegd. Onder andere voor de beheersing van het klimaat, maar ook productiekenmerken (zie ook hoofdstuk 4). Voor het vastleggen van een aantal parameters wordt weerstandsverandering gebruikt als meetprincipe.

2.4.1 Weerstandsverandering

De weerstandsverandering van stoffen wordt ingezet voor het meten van diverse parameters, zoals bijvoorbeeld temperatuur, relatieve vochtigheid (RV) en gewicht.

Temperatuur kan op verschillende manieren gemeten worden, onder andere met weerstanden die gevoelig zijn voor temperatuursverandering, zogenaamde thermistors. Dit zijn weerstanden van keramische polymeren waarvan de waarde zeer afhankelijk is van de temperatuur. Er bestaan zowel thermistors met positieve, als met negatieve temperatuurcoëfficiënten (PTC- of NTC-elementen). Daarnaast komen thermokoppels veel voor, bestaande uit twee verschillende metalen waartussen afhankelijk van de temperatuur een elektrisch veld ontstaat. Thermistors zijn nauwkeuriger bij normale omgevingscondities, voor extremere omstandigheden wordt vaak een thermokoppel gekozen. Een ander meetprincipe is met monokristallijne PN-overgangen, plat gezegd een temperatuurafhankelijke transistor. De geleidbaarheid voor elektrische stroom van een PN-overgang is temperatuurafhankelijk. Een voorbeeld is de AD592 temperatuurtransmitter. Voor temperatuurmetingen wordt ook wel de verandering van weerstandswaarde gebruikt. Voor precisie metingen is dat vaak platinadraad, bijvoorbeeld PT100 of PT1000.

Relatieve vochtigheid (RV) kan met voor vocht gevoelige weerstanden gemeten worden. Dit zijn capacitieve sensoren waarbij naar verandering in de diëlektrische constante van een materiaal gekeken wordt. Door de toegenomen nauwkeurigheid en eenvoud waarmee capaciteit kan worden gemeten hebben deze sensoren een grote vlucht genomen.

Gewichten kunnen worden gemeten met behulp van zogenaamde drukstaven. Hierbij wordt het verbuigen of torderen van krachtopnemers gemeten met rekstrookjes. Dit zijn strips van weerstandsmateriaal. De weerstand verandert met het uitrekken (of indrukken) van het strookje. Door de mate van uitrekken van het strookje te koppelen aan het verbuigen van de drukstaaf kan een kracht-waarde, eventueel gerelateerd aan een gewicht, worden bepaald. Meten van gewichten wordt in de veehouderij o.a. gebruikt om de groei te volgen (vleesvarkens, vleeskuikens) of de voervoorraad en -opname te controleren.

3 Prestatiekenmerken sensoren

In het Air Sensor Guidebook (Williams *et al.*, 2014a) worden volgende prestatiekenmerken gedefinieerd:

- Bias;
Met de Engelstalige term 'bias' wordt aangegeven hoe goed het apparaat in staat is gemiddeld de daadwerkelijke (juiste) concentratie weer te geven. Met bias worden afwijkingen met een systematisch karakter bedoeld. In het eenvoudigste geval is sprake van een constante systematische over- of onderschatting, dit wordt ook wel een offset genoemd. In dat geval kan het signaal eenvoudig gecorrigeerd worden door de bias van het signaal af te trekken dan wel op te tellen. Vaak is de relatie tussen omvang bias en signaalniveau echter complexer en zijn lineaire ($y = ax + b$) of hogere graad functies nodig om het signaal te corrigeren dan wel te 'kalibreren' naar de gemiddeld juiste waarde.
- Precisie;
Precisie (of ruis) is de mate waarin het meetsignaal bij gelijke concentratie varieert door toedoen van toevallige effecten. Oorzaken kunnen van buitenaf komen, in de hardware van het toestel gelegen zijn of ontstaan door dataprocessing in het apparaat zelf of de randapparatuur (firmware). De precisie bepaalt in hoeverre data in de tijd geaggregeerd moet worden, om tot een zinnige interpretatie te kunnen komen. Samen met de bias geeft de precisie de onzekerheid van een meting weer.
- Kalibratie;
Bij apparatuur wordt doorgaans over kalibratie gesproken, afhankelijk van de context betreft het dus een apparatuur- dan wel datakalibratie. Door de apparatuur op één of meerdere concentraties te vergelijken met een referentie (bijvoorbeeld het aanbieden van een kalibratiegas met een bekende waarde) worden eventuele afwijkingen vastgesteld. Soms is het mogelijk de apparatuur bij te stellen waardoor de weergegeven concentratie overeenkomt met de werkelijkheid. In dat geval wordt er gesproken over justeren/een justatie. In andere gevallen is het mogelijk de data na afloop te corrigeren met behulp van kalibratieconstanten, zodat de gecorrigeerde data zo goed mogelijk met de werkelijkheid overeen komt.
- Detectielimiet (LoD) en 'Level of Quantification' (LoQ);
Met de detectielimiet (Limit of detection, LoD) wordt de concentratie bedoeld die nog juist door een apparaat gemeten kan worden. Daaronder is de aanwezigheid van het doelgas of van fijnstof niet met voldoende betrouwbaarheid vast te stellen, maar ook niet uit te sluiten. Precisie heeft een bepalend effect op de detectielimiet, waardoor deze lager wordt bij langere middelingstijden. Veelal wordt de detectielimiet gedefinieerd als driemaal de standaardafwijking van blanco-metingen. De kans op het ten onrechte toekennen van een positieve concentratiewaarde aan een blanco-monster is dan minimaal, maar de kans op het missen van een positieve concentratie (waarden < LoD) is dan 50%. Naast LoD wordt ook het begrip Limit of Quantification (LoQ) gehanteerd. Dit wordt veelal gelijkgesteld gesteld aan zes tot tienmaal de standaardafwijking van blanco-metingen. Dit is het meetniveau waarbij de kans op het missen van een positief concentratieniveau (meetwaarden < LoD) nagenoeg afwezig is.
- Responstijd;
De responstijd geeft aan hoe lang een meetinstrument erover doet om een aangeboden concentratie weer te geven. Twee waarden zijn gangbaar, de tijd verstreken totdat het toestel 50 of 90% van de concentratie weergeeft (t_{50} resp. t_{90}). Voor langzaam reagerende sensoren wordt het eerste gebruikt, voor snellere het tweede. Het belang van de responstijd hangt af van hoe snel de concentratie kan variëren, en is van invloed op meetduur en -frequentie.
- Lineariteit van sensorrespons;
Idealiter geven instrumenten een respons in een 1:1 relatie tot de aangeboden concentratie. Veel sensoren reageren echter niet lineair maar vertonen een responscurve. Er zal dan een hogere graad functie nodig zijn om de sensor te kalibreren. Vanaf de tweede graad ontstaat hierbij het probleem dat een zekere respons met verschillende concentraties kan corresponderen. Ook is de gevoeligheid niet over het hele meetbereik hetzelfde (wordt lager naarmate de curve minder steil loopt).

-
- **Meetduur;**

De meetduur is de tijdsduur waarover een meting plaatsvindt. Hoe korter het interval, des te beter pieken kunnen worden waargenomen. De minimale meetduur is afhankelijk van zaken als responstijd en benodigde precisie, en de daadwerkelijk te kiezen meetduur van het meetdoel. Voor stationaire metingen is deze doorgaans langer dan bij mobiele metingen, en bij continue metingen gaat ook de hoeveelheid te verwerken/interpreteren data een rol spelen.
 - **Meetfrequentie;**

De meetfrequentie geeft het aantal metingen dat gedurende een bepaalde tijdsperiode uitgevoerd wordt aan. Om representatief te meten is het niet altijd nodig continue metingen te doen. Veelal vertonen concentratiepatronen in stallen sterke correlaties tussen opeenvolgende korte meetintervallen, waardoor langdurig meten met hoge meetfrequenties niet veel extra informatie oplevert. Eens in de zoveel tijd meten kan ook voldoende informatie geven, terwijl minder data verwerkt hoeft te worden en sensoren langer meegaan. Hiervoor zouden eisen aan de datakwaliteit opgesteld moeten worden.
 - **Data-aggregatie;**

Met data-aggregatie wordt de resolutie bedoeld waarmee data gepresenteerd ofwel gemiddeld wordt (zoals minuut-, uur-, dag- of jaargemiddeld). Keuze hierin is afhankelijk van het doel van de meting, waarbij op dezelfde data verschillende aggregaties kunnen worden toegepast. Daarmee wordt de data voor meerdere doelen (bijvoorbeeld procesbewaking en toetsing aan de doelvoorschriften) bruikbaar.
 - **Selectiviteit;**

Hiermee wordt het vermogen van een sensor om alleen op het doelgas te reageren bedoeld. Sommige sensoren reageren ook op andere verbindingen in de lucht, wat bekend staat als kruisgevoeligheid. Dit leidt over het algemeen tot overschatting van de gemeten concentratie.
 - **Interferenties;**

Naast andere gassen kunnen ook omgevingsomstandigheden de meting beïnvloeden. Als er in het ontwerp rekening mee gehouden wordt, vallen oorzaken als radio-interferentie, spanningsfluctuaties en vervuiling te minimaliseren. Voor niet te controleren omstandigheden valt soms te corrigeren (bijvoorbeeld temperatuur en vocht), mits de heersende condities (en het sensorgedrag) bekend zijn.
 - **Sensorvergiftiging en verval;**

Afhankelijk van het soort sensor is het mogelijk dat bepaalde gassen tot schade leiden. Ook kunnen het gebruikte elektrolyt of de LEDs/lasers en diodes verouderen. Dit leidt in beide gevallen tot een afname in de gevoeligheid, soms tot wel de helft gedurende de levensduur van de sensor.
 - **Meetbereik;**

Sensoren zijn ontwikkeld voor verschillende doeleinden, en hebben daarmee ook verschillende meetbereiken (bereik tussen detectielimiet (LoD) en maximale meetwaarde). Het is van belang een sensor te kiezen die qua meetbereik overeenstemt met het verwachte concentratiebereik waarin deze ingezet gaat worden. De sensor moet daarnaast over afdoende gevoeligheid (uitgedrukt in ampère, volt of ohm per ppm) beschikken om een zinvol onderscheid in gemeten concentratie te kunnen maken.
 - **Drift;**

Drift is het geleidelijk verlopen van de sensorrespons ten opzichte van een referentie (zoals een kalibratiegas). De mate waarin drift optreedt zou het kalibratie-interval kunnen dicteren, al kan er onder de aanname dat verloop lineair over de tijd plaats vindt ook achteraf gecorrigeerd worden. Het is wellicht mogelijk alternatieven te vinden door bijvoorbeeld nulbepaling van de sensoren met buitenlucht of een meer geavanceerde omgang met data. Gedacht kan worden aan een kalibratie op momenten dat de verwachte concentratie laag is of een zeker constant niveau bereikt.
 - **Nauwkeurigheid tijdstempel;**

Gelijklopende klokken zijn van belang voor het onderling vergelijken van metingen, en in het geval van emissiemetingen voor het correct bepalen van het verschil tussen in- en uitgaande lucht. Bij voorkeur wordt het tijdstempel gezet door een centraal data-acquisitiesysteem, waardoor verloop van klokken niet van invloed is op de synchronisatie van de data.
 - **Klimaatgevoeligheid;**

Met klimaatgevoeligheid wordt de invloed van meteorologische omstandigheden gedurende het jaar bedoeld. Deels kan hiervoor gecorrigeerd worden (zie bij interferenties) maar de sensor moet wel de

gehele te verwachten range aankunnen. Met andere zaken zoals zoninstraling kan bij het ontwerp en/of de installatie rekening gehouden worden.

- Datacompleteheid;
Ook vaak aangeduid als 'data capture', staat voor het percentage van de verwachte data, dat daadwerkelijk gerealiseerd wordt. Redenen voor uitval van data zijn problemen in de data-overdracht, tijd voor onderhoud en kalibratie en door stroomuitval. Effecten kunnen geminimaliseerd worden door data back-up bij de sensoren, uitwisselen van apparatuur ten tijde van onderhoud en/of kalibratie op locatie en het voorzien in noodstroom.
- Reactie op stroomuitval;
Sensoren kunnen een aanzienlijke opwarmtijd hebben, zelfs na een korte stroomuitval. Daarnaast zou de sensorrespons hetzelfde moeten zijn voor en na de stroomuitval. Ten slotte is het belangrijk, dat het sensor(-systeem) de meting automatisch hervat wanneer de stroomvoorziening weer hersteld is.

Sommige van bovengenoemde prestatiekenmerken spelen een rol bij de initiële keuze voor een sensor, zoals de detectielimiet, meetbereik en klimaatgevoeligheid. Gezien de variëteit aan te verwachten condities (binnen-buiten, hoge-lage concentratie) zal mogelijk niet steeds dezelfde sensor gekozen kunnen worden. Dit kan de interpretatie van de resultaten bemoeilijken. Sowieso kunnen er verschillen zijn in selectiviteit, interferenties en sensorvergiftiging/verval tussen (paren van) sensoren, die bijvoorbeeld voor en achter een luchtwasser geplaatst zijn.

Deze en andere punten van bovenstaande lijst zullen deels geadresseerd worden in een ontwikkeling zijnde Europese norm voor sensormetingen. Ook in de databewerking verdienen bepaalde punten aandacht (onder andere interferenties en drift) om tot een goed resultaat te kunnen komen.

4 Beschikbare sensoren

In dit hoofdstuk wordt een, niet-uitputtend, overzicht gegeven van de meettechnieken en commercieel verkrijgbare sensoren die beschikbaar zijn voor de in stallen te meten gassen (NH₃, geur en CO₂), evenals fijnstof (PM₁₀ en PM_{2,5}). Ook wordt kort ingegaan op de ontwikkeling van sensoren en meetprincipes, al dan niet buiten de veehouderij. Omdat de sensoren en technieken die worden toegepast voor het meten van klimaatfactoren als temperatuur en RV algemeen worden toegepast, is in dit hoofdstuk geen lijst met leveranciers hiervan opgenomen. Wel wordt in een overzicht weergegeven bij welke diercategorieën deze parameters, samen met enkele productietekens, zoal worden gemeten en vastgelegd.

4.1 Concentratie metingen

Sensoren voor het meten van concentraties worden ook toegepast in veiligheids- en procesapparatuur. Ze worden hiervoor doorgaans in opdracht gemaakt, zodat niet altijd duidelijk is wie de oorspronkelijke fabrikant (OEM: Original Equipment Manufacturer) is.

In onderstaande tabellen wordt o.a. het meetbereik aangegeven voor de diverse sensoren, zoals opgegeven door de betreffende fabrikant of leverancier. Opgemerkt dient te worden dat de fabrikant in veel gevallen aangeeft dat het meetbereik bij "0" begint (bijv. 0 - 100 ppm), zonder dat aangegeven wordt wat de detectielimiet is. Wanneer de detectielimiet bijv. 0,5 ppm zou bedragen, zou het beter zijn om het meetbereik weer te geven als 0,5 - 100 ppm in plaats van 0 - 100 ppm. Omdat niet voor alle sensoren bekend is wat de detectielimiet daadwerkelijk is, is ervoor gekozen om het door de fabrikant opgegeven meetbereik beginnend bij "0" weer te geven in onderstaande tabellen.

4.1.1 Ammoniak

Voor NH₃ zijn metaaloxide (MOx) en elektrochemische sensoren beschikbaar. Losse metaaloxide sensoren kosten ca. 10 euro/stuk, elektrochemische vallen in de range van 50 tot 150 euro/stuk.

Tabel 1 Overzicht van enkele NH₃-sensoren met hun kenmerken

Fabrikant	Type	Meetprincipe	Meetbereik	Gevoeligheid
Alphasense	NH3-B1	Elektrochemisch	0-100 ppm	20-45 nA/ppm bij 50 ppm NH ₃
City Technology	Sensoric NH3 3E 100 SE	Elektrochemisch	0-100 ppm	130 ± 30 nA/ppm
Membrapor	NH3/CR-50	Elektrochemisch	0-50 ppm	155 ± 30 nA/ppm
Membrapor	NH3/CR-200	Elektrochemisch	0-100 ppm	90 ± 18 nA/ppm
SGX Sensortech	MiCS-5914	Metaaloxide	100-10.000 ppb	10-1500 kΩ
SGX Sensortech	SGX-7NH3	Elektrochemisch	0-100 ppm	115 ± 45 nA/ppm
SGX Sensortech	SGX-4NH3	Elektrochemisch	0-100 ppm	100 ± 30 nA/ppm

Bron: websites genoemde fabrikanten (zie literatuurlijst).

Opgemerkt dient te worden dat het meetbereik in werkelijkheid meestal niet bij "0" begint maar bij een hogere concentratie.

Voor buitenluchtmonitoring lijken commercieel beschikbare NH₃-sensoren - gezien de huidige detectielimiet - nog niet geschikt.

4.1.2 Geur

De eenheid voor geurconcentratie en op basis hiervan berekende geuremissies, zoals toegepast in de emissiefactoren in de Rgv, worden bepaald met de zogenoemde olfactometrische meetmethode. De Europese standaard EN13725 is de algemeen gebruikte methode. Hierbij wordt een luchtmonster uit de stal met het te onderzoeken systeem opgeslagen in een geurloze zak. Deze lucht wordt in een aflopende verdunningsreeks aangeboden aan een panel in een geurlaboratorium, beginnend met een verdunningsniveau waarbij de geur niet waarneembaar is. De concentratie van de verdunning waarbij de helft van het panel net de geur kan onderscheiden van geurloze lucht, is per definitie gelijk aan 1

geureenheid (OU_E/m^3). Een geurmonster dat dit niveau bereikt bij een verdunning met een factor 1000 bevat dan onverdund 1000 geureenheden/ m^3 . Er wordt dus niet gemeten aan een specifieke stof of gas die een indicator of proxy zou kunnen zijn voor de via de geurpanels bepaalde waarde voor de geurconcentratie.

Als een ruwe proxy voor geur, kan het bredere spectrum van vluchtige organische stoffen (VOS) gemeten worden met MOx -sensoren en foto ionisatie detectoren (PID). Voor het totaal aan VOS in de buitenlucht geeft Williams *et al.* (2014a) een waarde tussen 5 en 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en een bruikbare detectielimiet van 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Er zijn ook elektrochemische sensoren voor specifieke gassen binnen deze verzameling, waaronder H_2S . Volgens Thorne *et al.* (2009) vallen in varkensstallen concentraties tussen de 20 en 150 ppb H_2S te verwachten, hiermee is rekening gehouden bij onderstaande selectie van sensoren (meetbereik > 100 ppm). Voor prijsindicatie zie ammoniak, PID-sensoren vallen in de prijsrange 300-500 euro.

Tabel 2 Overzicht van enkele sensoren voor VOS en H_2S met hun kenmerken

Fabrikant	Type	Meetprincipe	Meetbereik	Gevoeligheid
Alphasense	VOS Sensor	Metaaloxide	1-100 ppm	$220 \pm 45 \text{ k}\Omega$
Alphasense	PID-AH2 (VOS)	Foto ionisatie detector	0-50 ppm	20 mV/ppm
SGX Sensortech	MiCS-5524 (VOS)	Metaaloxide	30-400 ppm	100-1500 k Ω
Alphasense	Hydrogen Sulfide Sensor	Metaaloxide	1-100 ppm	$280 \pm 50 \text{ k}\Omega$
Alphasense	H2S-A4	Elektrochemisch	0-50 ppm	1400-1850 nA/ppm
Alphasense	H2S-B4	Elektrochemisch	0-100 ppm	1450-2150 nA/ppm
City Technology	Sensoric H2S 2E 50 S	Elektrochemisch	0-50 ppm	$380 \pm 80 \text{ nA/ppm}$
City Technology	Sensoric H2S 3E 100 S	Elektrochemisch	0-100 ppm	$750 \pm 150 \text{ nA/ppm}$
City Technology	3HH CiTiceL (H_2S)	Elektrochemisch	0-50 ppm	$1,70 \pm 0,30 \mu\text{A/ppm}$
City Technology	4H CiTiceL (H_2S)	Elektrochemisch	0-100 ppm	$1,20 \pm 0,25 \mu\text{A/ppm}$
Membrapor	H2S/C-50	Elektrochemisch	0-50 ppm	$1700 \pm 300 \text{ nA/ppm}$
Membrapor	H2S/C-200	Elektrochemisch	0-200 ppm	$370 \pm 80 \text{ nA/ppm}$
SGX Sensortech	SGX-7H2S	Elektrochemisch	0-50 ppm	$1700 \pm 400 \text{ nA/ppm}$
SGX Sensortech	SGX-4H2S	Elektrochemisch	0-100 ppm	$700 \pm 250 \text{ nA/ppm}$
SGX Sensortech	EC4-100-H2S	Elektrochemisch	0-100 ppm	600-1000 nA/ppm

Bron: websites genoemde fabrikanten (zie literatuurlijst).

Opgemerkt dient te worden dat het meetbereik in werkelijkheid meestal niet bij "0" begint maar bij een hogere concentratie.

VOS-sensoren zijn met beperkt succes getest onder laboratorium- en veldcondities (Williams *et al.*, 2015). Recent hebben Spinelle *et al.* (2017b) een literatuurreview gepresenteerd.

Elektronische neuzen maken doorgaans gebruik van een aantal breed spectrum sensoren, waarbij de combinatie van hun karakteristieken ervoor zorgt dat de meeste veranderingen in luchtkwaliteit gedetecteerd worden. Een bekende uitvoering is de eNose van Comon Invent, maar er zijn meer commerciële implementaties en studies beschikbaar (met een focus op de veehouderij bijvoorbeeld Pogfay *et al.*, 2010).

4.1.3 Fijnstof

Sensoren voor fijnstof berusten doorgaans op een optisch principe (deeltjestellers). De goedkoopste uitvoeringen hebben een LED als lichtbron, wat duurdere maken gebruik van laserlicht. Prijzen variëren van 5 tot ongeveer 3.000 euro. In de buitenlucht kan een range tussen 0-100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ worden verwacht (als 24-uursgemiddelde) en is een detectielimiet van 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ op het 24-uursgemiddelde een bruikbare ondergrens (Williams *et al.*, 2014a).

Tabel 3 Overzicht van enkele fijnstof-sensoren en meetsystemen met hun kenmerken

Fabrikant	Type	Meetprincipe	Meetbereik	Deeltjesgrootte
Sharp	GP2Y1010AU0F	Optisch	0-0,5 mg/m ³	onbekend
Samyoung	DSM501A	Optisch	onbekend	>1 µm
Shinyei	PPD42NS	Optisch	0-28.000 counts/l	1-10 µm
Nova Fitness	SDS011	Optisch	0-1999,9 µg/m ³ (PM ₁₀), 0-999,9 µg/m ³ (PM _{2,5})	0,3-10 µm
Plantower	PMS 7003	Optisch	onbekend	0,3-10 µm
Alphasense	OPC-N2	Optisch	0-10.000 counts/s	0,38-17 µm
<i>Onderstaande zijn complete meetsystemen</i>				
Dylos	DC1100	Optisch	onbekend	0,5-10 µm
ECN	AirBox	Optisch	onbekend	1-10 µm
Sintrol	Dumo	Inductieve elektrificatie	onbekend	>0,3 µm
TSI Inc.	DustTrak	Optisch	0,001-100 mg/m ³	0,1-10 µm

Bron: websites genoemde fabrikanten (zie literatuurlijst).

Opgemerkt dient te worden dat het meetbereik in werkelijkheid meestal niet bij "0" begint maar bij een hogere concentratie.

Er zijn behoorlijke verschillen in uitvoering en daarmee toepassing van de sensoren. De Sharp is passief en heeft doorstroming door externe bron (ontwikkeld voor gebruik in airco's). Bij de Shinyei wordt gebruik gemaakt van convectie die ontstaat door de warmteproductie van een weerstand. De overige toestellen hebben alle een ventilator en geven PM₁₀ en PM_{2,5} waarden, de Plantower en Alphasense bovendien een deeltjesgrootteverdeling. Een ander belangrijk verschil vormt de deeltjesgrootte die de verschillende sensoren kunnen waarnemen. Alle missen een gedeelte van de kleinere fractie tot 2,5 µm, maar omdat grovere deeltjes in stallen vaak domineren is ook de begrenzing van de bovenkant van het deeltjesgroottebereik van belang. Verschillende rapporten en websites geven vergelijkingen van dit soort sensoren onderling en met apparatuur uit luchtmeetnetten (Williams *et al.*, 2014b; aqicn.org; www.aqmd.gov/aq-spec/evaluations).

4.1.4 Koolstofdioxide

Meest gebruikte meetprincipe voor CO₂ is optisch, binnen het infrarode spectrum. Kosten van dergelijke sensoren liggen tussen de 200 en 400 euro per stuk. Om de in de buitenlucht te verwachten concentraties te kunnen meten is een meetbereik van 350-600 ppm nodig, waardoor een bruikbare detectielimiet 100 ppm is (Williams *et al.*, 2014a). Er zijn ook elektrochemische sensoren op de markt die CO₂ meten, maar van dit type sensoren is de gevoeligheid over het algemeen relatief laag.

Tabel 4 Overzicht enkele CO₂-sensoren met hun kenmerken

Fabrikant	Type	Meetprincipe	Meetbereik	Gevoeligheid
Alphasense	IRC-AT	Infrarood	0-5.000 ppm	± 10-50 ppm
Alphasense	IRC-A1	Infrarood	0-5.000 ppm	± 1-15 ppm
Vaisala	GMP222	Infrarood	0-2.000 ppm ¹	± 1,5%
Vaisala	GMP343	Infrarood	0-1.000 ppm ²	± 0,5%

¹ Meetbereik is te kiezen per uitvoering minimaal 0-2000 ppm maximaal 0-10.000 ppm

² Meetbereik is te kiezen per uitvoering minimaal 0-1000 ppm maximaal 0-5.000 ppm

Bron: websites genoemde fabrikanten (zie literatuurlijst).

Opgemerkt dient te worden dat het meetbereik in werkelijkheid meestal niet bij "0" begint maar bij een hogere concentratie.

Door de link met de kwaliteit van de binnenlucht zijn veel commerciële implementaties verkrijgbaar, o.a. van SenseAir, Extech en Atal. Een vergelijking van een aantal van deze sensoren is te vinden in Yasuda *et al.* (2012) en Spinelle *et al.* (2017a).

4.2 Omgevingsparameters en productiekenmerken

Met name in de intensieve veehouderij wordt het klimaat in de stallen geregeld om te zorgen voor optimale condities. De sturing was in eerste instantie volledig gebaseerd op de

omgevingstemperatuur. Door de ontwikkeling van diverse sensoren zijn daar andere parameters bij gekomen, zoals relatieve vochtigheid (RV) en CO₂. Ook worden in een aantal diercategorieën parameters ten aanzien van de productie (semi-)continu gevolgd. In onderstaande tabel is voor een aantal diercategorieën weergegeven welke parameters worden vastgelegd. Indien een diercategorie niet wordt genoemd, worden hier geen of nauwelijks parameters direct gemeten en vastgelegd. Wel zal daar een vorm van productieregistratie zijn.

Tabel 5 Overzicht (automatisch) vastgelegde parameters in de veehouderij

Diercategorie	Klimaatfactoren				Ventilatie-hoeveelheid		Productiekenmerken CO ₂ -massabalans					
	Temperatuur		Relatieve vochtigheid		CO ₂	NH ₃	Meet-waaier	Druk-verschil	Gewicht	Liters	Aantal ¹	Voer-opname
	Binnen	Buiten	Binnen	Buiten								
Melkkoeien										X ⁵		
Vleeskalveren	(X)		(X)								X	(X)
Gespeende biggen	X	(X)					X	X				
Kraamzeugen (+biggen)	X	(X)					X	X				
Guste en dragende zeugen (en beren)	X	(X)					X	X				
Vleesvarkens (en opfokzeugen)	X	(X)					X	X	(X)			(X)
Opfokleghennen	X	X	X	X	X	(X)		X ²	X ³		X ⁶	X
Leghennen	X	X	(X)	(X)	(X)			(X) ²	X ⁴		X ⁷	X
Opfok vleeskuikenouderdieren	X	X	X	X	X	(X)		X ²	X ³		X ⁶	X
Vleeskuikenouderdieren	X	X	(X)	(X)	(X)			(X) ²	X ⁴		X ⁷	X
Vleeskuikens	X	X	X	X	X	(X)		X ²	X ³		X ⁶	X
Vleeskalkoenen	X	X	X	X	X			X ²	X ³		X ⁶	X
Ouderdieren vleeseenden	X	(X)	(X)	(X)							X ⁷	X
Vleeseenden	X	X	(X)	(X)				X ²	X ³		X ⁶	X
Voedsterkonijn	X	(X)	X	(X)			(X)	(X)			X ⁶	
Vlees- en opfokkonijnen	X	(X)	X	(X)			(X)	(X)			X ⁶	

(X) = beperkt toegepast.

¹ Het aantal dieren wordt handmatig bijgehouden. Soms wel ingevoerd in een managementsysteem.

² De drukverschilmeting wordt gebruikt om de inlaatopeningen te regelen.

³ Gewicht dieren.

⁴ Gewicht dieren en eieren.

⁵ Liters melk.

⁶ Aantal aanwezige dieren.

⁷ Aantal aanwezige dieren en geproduceerde eieren.

Voor zover bekend worden in de rundveesector nog maar weinig parameters van zowel klimaat als productie (continu) vastgelegd. Wel is er een ontwikkeling in de vleeskalversector naar meer mechanisch geventileerde stallen. Het gebruik van meerdere sensoren voor het sturen op een goed klimaat zal daarmee ook verder opgang vinden.

In de varkenssector is het ventileren via een centraal afzuigkanaal in veel stallen aanwezig. Dit vanwege het toepassen van een luchtwasser voor het reinigen van de uitgaande luchtstroom. Op het centrale afzuigkanaal zijn meerdere afdelingen aangesloten, waarbij de ventilatiebehoefte van de individuele afdeling wordt geregeld op basis van temperatuur via een smookklep/diafragmaschuif. De terugkoppeling van het debiet gaat via een meetwaaier of drukverschilmeting. De centraal geplaatste ventilatoren worden veelal ook geregeld op basis van een drukverschilmeting. Bijsturen van het ventilatiedebiet op basis van of RV of CO₂ vindt in deze sector nog maar nauwelijks plaats.

In de pluimveesector is de staltemperatuur ook nog steeds de basis waarop het klimaat wordt gestuurd. Daarnaast krijgen RV en ook met name CO₂ een steeds grotere rol in het aanpassen van de ventilatiehoeveelheid. Toepassing van CO₂-sensoren is vooral toegenomen doordat open verbranding

(hete luchtkanonnen) in de stal minder aanwezig is, met daardoor minder hoge pieken in de CO₂-concentraties. Deze meting wordt vooral toegepast bij groeiende dieren die vanaf een leeftijd van 0 dagen in de stal aanwezig zijn en een grote warmtebehoefte hebben. Om het warmteverlies te beperken is spaarzaam ventileren gewenst, zonder dat de CO₂-concentratie te hoog oploopt. Bij volwassen dieren, die eieren produceren, komt deze meting minder voor.

In de kleinere sectoren, zoals vleeskalkoenen, eenden en konijnen, worden in de grotere pluimveesectoren ontwikkelde technieken vaak wat later toegepast. Dit geldt ook voor metingen ten aanzien van RV en CO₂.

NH₃-sensoren worden nog maar incidenteel gebruikt bij het sturen op een optimaal klimaat. Hoge concentraties kunnen echter invloed hebben op de gezondheid en het welzijn van de dieren (en veehouder). In het Besluit houders van dieren is in artikel 2.5 lid 4 opgenomen dat de luchtcirculatie, het stofgehalte van de lucht, de temperatuur, de relatieve luchtvochtigheid en de gasconcentraties in de omgeving niet schadelijk mogen zijn voor het dier. Voor vleeskuikens zijn in artikel 2.57 specifieke eisen opgenomen ten aanzien van ammoniak (<20 ppm), temperatuur (max. 3°C hoger dan de buitentemperatuur bij temperaturen >30°C in de schaduw) en RV (<70% gemiddeld over 48 uur bij buitentemperatuur <10°C). Bij de andere in het besluit genoemde diercategorieën worden geen eisen gesteld aan deze klimaatfactoren.

Vanwege het 'open' karakter van de eis in artikel 2.5 van het Besluit houders van dieren, is de Nederlandse Voedsel en Waren Autoriteit (NVWA) een project gestart om hier meer invulling aan te geven. Op basis van in de praktijk geadviseerde waarden en een aantal signaalindicatoren (voor varkens beoordeeld in Vermeer en Hopster (2017)), wordt gekeken of het klimaat in de stallen mogelijk schadelijk is voor de dieren. Eind 2017 is gestart met een pilot in de varkenshouderij. In de tabel zijn ook enkele productietekens opgenomen. Deze zijn nodig als het ventilatiedebiet wordt bepaald op basis van de CO₂-massabalans (zie ook paragraaf 2.2).

4.3 Onderzoekslijnen en toekomstige ontwikkelingen

Praktisch onderzoek naar de nauwkeurigheid en toepassingsmogelijkheden van een ammoniaksensor in stalomgevingen is recent uitgevoerd door WLR (Melse *et al.*, 2016; Mosquera *et al.*, 2017) en wordt momenteel vervolgd met onderzoek naar specifieke toepassingen voor luchtwassers, pluimveestallen en melkveestallen. Wat betreft het continu registreren van emissies in rundveestallen is er eveneens een SBIR-project in uitvoering door CLM (SBIR: Small Business Innovation Research, ondersteuningskader van RVO voor stimuleren innovatie), getiteld 'Ontwikkeling van Ammoniak Management Systeem met meetmodule'. De exacte stand van zaken wat betreft de resultaten uit dit project zijn nog niet in publieke rapportages beschikbaar.

Aangezien er op de sensorenmarkt veel onderlinge concurrentie is, worden toekomstige ontwikkelingen niet gedeeld. Wel valt te verwachten dat bepaalde huidige ontwikkelingen zullen doorzetten. Allereerst wordt de infrarood spectrometer steeds kleiner en goedkoper, deze trend lijkt zich ook in de toekomst voort te zetten. Binnen de melkveehouderij neemt de roep naar methaansensoren toe, naar verwachting kunnen infrarood spectrometers hier in de toekomst aan voldoen. Ook lachgas wordt steeds belangrijker, een ontwikkeling hierop met behulp van infrarood spectrometers is niet snel te verwachten aangezien lachgas op een ander deel van het spectrum actief is (net als ammoniak). Hiernaast zal de ontwikkeling van sensoren vooral komen door daadwerkelijke metingen op verschillende locaties, met name testen hoe de sensoren op de langere termijn functioneren is van belang. Specifiek voor stallen is het testen van sensoren naast high-end meetapparatuur in de stalomgeving zeer belangrijk. Alleen hierdoor kunnen matrixeffecten en cross-interferenties van sensoren in kaart worden gebracht.

Voor lange termijn vindt er strategisch onderzoek plaats aan nieuwe generaties gassensoren die de huidige nadelen van metaaloxide sensoren (hoge temperaturen, niet-specifiek en interferentiegevoelig) kunnen ondervangen. Zo is er recent een meerjarige NWO-gefinancierde studie opgestart waarin sensoren worden ontwikkeld met poreuze organische polymeren die, afhankelijk van de opgelegde ruimtelijke structuur van de polymeren, als selectieve chemische grijpparmen voor specifieke gassen functioneren. Hiermee kunnen selectief gassen worden ingevangen en bij kamertemperatuur worden gedetecteerd. Naar verwachting kan deze nieuwe generatie sensoren worden ingezet in de industrie, voedingsmiddelenbranche en beveiliging. In eerste instantie richt dit onderzoek zich op het 'proof of principle' van de techniek (Resource, 2018).

5 Huisvestingssystemen en gemeten concentraties

Emissies van ammoniak, geur en fijnstof en de stalconcentraties zijn afhankelijk van diercategorie en huisvestingstelsel. Om een indruk te krijgen wat de verschillen zijn en welke waarden in de praktijk gangbaar zijn, wordt in de volgende paragrafen een overzicht met toelichting gegeven.

5.1 Huisvestingssystemen en management

In Tabel 6 is een overzicht gegeven per diercategorie van huisvesting, belangrijke managementfactoren en de voorkomende ventilatie. Er is bewust geen opsomming gemaakt van alle voorkomende staltypen zoals weergegeven in de Regeling ammoniak en veehouderij (Rav), wel wordt de hoofdingeling van de Rav gevolgd. Reden is dat het voor het continu registreren van concentraties geen groot verschil maakt welk staltype binnen elke categorie wordt toegepast. Wel belangrijk is welke vorm van ventilatie het meest gebruikelijk is (zie paragraaf 5.2). We pretenderen niet volledig te zijn met onderstaande tabel, maar een indruk te geven van de meest toegepaste systemen.

Tabel 6 Overzicht toegepaste huisvestingssystemen en management in de veehouderij

Rav- code	Diercategorie	Huisvesting			Ventilatiesysteem						
		Stalgebruik	Over- dekte uitloop	Vrije uitloop/ bewei- den	Mechanisch				Natuurlijk		
		Hele jaar	Deel van jaar		Dakkokers	Gevel- ventilatoren	Centrale afzuiging	Luchtbehande- ling uitgaande luchtstroom ¹	Geïjkdruk	Open nok	Zijwanden
A 1	Melkkoeien >2jr	X	X	X		X		(X)		X	X
A 2	Zoogkoeien >2jr		X	X		X				X	
A 3	Jongvee <2 jr	X	X	X						X	
A 4	Vleeskalveren <8 mnd	X			X			X	X	X	
A 6	Vleesstieren + overig 8-24 mnd	X								X	X
A 7	Fokstieren + overig >2 jr	X	X	X						X	
B 1	Schapen (+ lammeren <45 kg)		X			X				X	
C 1	Geiten >1 jr	X		(X)				(X)		X	X
C 2	Opfokgeiten 61 dgn - 1 jr	X								X	X
C 3	Opfokgeiten + lammeren <61 dgn	X								X	X
D 1.1	Gespeende biggen	X			X		X	X			
D 1.2	Kraamzeugen (+ biggen)	X			X		X	X			
D 1.3	Guste en dragende zeugen	X	(X)	(X)	X	X	X	X		(X)	
D 2	Dekberen >7 mnd	X			X	X	X	X		(X)	
D 3	Vleesvarkens, opfokberen, opfokzeugen	X	(X)	X	X	X	X	X		(X)	
E 1	Opfokleghennen (<18 wkn)	X		(X)	X	X		X			
E 2	Leghennen (+ ouderdieren) (>18 wkn)	X		X	X	X		X	(X)	(X)	
E 3	Opfokvleeskuikenouderdieren (<19 wkn)	X			X	X		(X)			
E 4	Vleeskuikenouderdieren (>19 wkn)	X			X	X		(X)			
E 5	Vleeskuikens	X		X	(X)	X	(X)	(X)	(X)	(X)	
E 6	Mestbewerking en -opslag	X	X					(X)		X	X
F 4	Vleeskalkoenen	X		(X)	X			(X)	(X)	X	
G 1	Ouderdieren vleeseenden	X			X	X		X		X	
G 2	Vleeseenden	X			X	X		X		X	
H 1	Edelpelsdieren	X			X					X	X
I 1	Voedster + ram + jongen	X			X	X					
I 2	Vlees- en opfokkonijnen	X			X	X					

(X) = beperkt toegepast

¹ De behandeling van de uitgaande luchtstroom kan een luchtwasser of een droogtunnel zijn.

Enkele niet veel of geheel niet in Nederland voorkomende diercategorieën zijn niet opgenomen in de tabel, evenals de diercategorie paarden (K).

Per diercategorie zijn soms meerdere huisvestingsopties mogelijk. In de melkveehouderij komt zowel continu opstallen als deels opstallen met beweiden voor. In de pluimveesector worden voor de ventilatie zowel dakkokers als (eind-)gevelventilatoren op dezelfde stal toegepast. Dit kan consequenties hebben voor de wijze van registreren van emissies.

In de varkenshouderij wordt vrije uitloop en beweiding vooral toegepast bij de biologische bedrijven. In de pluimveesector wordt vrije uitloop naast biologische bedrijven ook toegepast op reguliere legbedrijven. Voor de op deze wijze geproduceerde eieren volgens wordt een aparte codering binnen de afzetmarkt toegepast.

Naast de huisvestingskenmerken en managementmaatregelen die van invloed (kunnen) zijn op de emissies, zijn ook enkele productiekenmerken opgenomen die al of niet automatisch worden geregistreerd op de bedrijven. Deze productiekenmerken kunnen worden gebruikt bij het opstellen van een CO₂-massabalans voor het berekenen van het ventilatiedebiet.

5.2 Overzicht gemeten concentraties

In deze paragraaf worden de resultaten gepresenteerd van een analyse die uitgevoerd is om te bepalen welke concentraties te verwachten zijn in en buiten de stal. De database die gebruikt is voor deze analyse bevat data afkomstig van emissiemetingen die door Wageningen Livestock Research zijn uitgevoerd en gerapporteerd in de periode 1991-2016. De metingen zijn in verschillende diercategorieën onder te verdelen (varkens, pluimvee, melkvee).

Stallen in de varkens- en pluimveehouderij worden meestal mechanisch geventileerd (lucht komt de stal in via duidelijke inlaatopeningen, en verlaat de stal via duidelijke uitlaatopeningen door middel van ventilatiekanalen voorzien van ventilatoren). Melkveestallen worden meestal natuurlijk geventileerd (door middel van een open nok en ventilatieopeningen in de lengtegevels; afhankelijk van de weersomstandigheden, met name windrichting en windsnelheid, kunnen de ventilatieopeningen soms zowel als inlaat- als uitlaatopeningen fungeren).

Een groot aantal van de metingen is uitgevoerd door gebruik te maken van het meetprotocol voor emissiefactoren huisvestingssystemen ("oud protocol") dat gebaseerd was op semi-continue metingen (minimaal één concentratiewaarde per uur) gedurende één of meerdere productieronden (afhankelijk van de diercategorie) en op één bedrijf (per huisvestingssysteem). Bij deze metingen is voor de NH₃-concentratie voornamelijk gebruik gemaakt van NO_x-monitoren en de gaswasflesmethode (impingers). Fijnstof is onder het 'oude protocol' niet gemeten.

Sinds 2008 worden de metingen voor het vaststellen van emissiefactoren voornamelijk uitgevoerd volgens een meetprotocol gebaseerd op metingen op meerdere locaties ("nieuw protocol"), gedurende 6 meetperioden verdeeld over het jaar (seizoenen) en de productieronden (afhankelijk van de diercategorie). Deze meetperioden dienen minimaal een 24-uursgemiddelde te leveren. Hierbij is voor NH₃ vooral gebruik gemaakt van NO_x-monitoren en lasermeetmethode. Tevens is in die periode een standaard ontwikkeld voor PM₁₀/PM_{2,5}-metingen in stallen (Hofschreuder *et al.*, 2008), gebaseerd op een gravimetrische methode, afgeleid van de Europese standaard voor buitenlucht (EN 12341 voor PM₁₀ en de toenmalige EN 14907 voor PM_{2,5}).

In de database werd, naast de concentraties van NH₃, CO₂, PM₁₀, PM_{2,5} en totaalstof in de inkomende en uitgaande stallucht, ook informatie verzameld over zowel de diercategorie (varkens, pluimvee, melkvee), het ventilatieregime (mechanische vs. natuurlijke ventilatie), het toegepaste meetprotocol (oud vs. nieuw) en een aantal klimaatomstandigheden (temperatuur in en buiten de stal; relatieve luchtvochtigheid in en buiten de stal).

Het is niet aannemelijk dat het concentratiebereik bij de metingen binnen de stallen beïnvloed wordt door de verandering in het toegepaste meetprotocol (oud vs. nieuw). Uiteraard zal dit ook geen invloed hebben gehad in de metingen buiten de stallen. Daarnaast spelen het ventilatieregime en de diercategorie waar metingen worden uitgevoerd een belangrijke rol. Bij diercategorieën waar mechanische ventilatie wordt toegepast, kan het ventilatiedebiet in de stal beter worden gereguleerd, waardoor het ventilatiedebiet bij mechanisch geventileerde stallen over het algemeen lager is dan bij dezelfde soort stallen die natuurlijk geventileerd worden. De verwachting is dat dit tot lagere concentraties zal leiden in natuurlijk geventileerde stallen, vergeleken met mechanisch geventileerde stallen. Voor de analyse werd naar diercategorie in plaats van naar ventilatieregime gekeken,

aangezien er in de database twee diercategorieën zijn (pluimvee en varkens) die mechanische ventilatie toepassen.

De verdeling van de gemeten waarden van alle onderzochte parameters, weergegeven in Figuur 5.1, laat zien dat het effect van de keuze van protocol (oud vs. nieuw) op de verdeling klein is. De mediaan (50% van de waarnemingen bevinden zich onder en 50% van de waarnemingen boven de mediaan) is voor bijna alle parameters gelijk wanneer gekeken wordt naar metingen die uitgevoerd zijn met het oude protocol, vergeleken met het nieuwe protocol. De verdeling is qua patroon ook vergelijkbaar. Dit betekent dat deze metingen voor de analyse gecombineerd kunnen worden.

Wat betreft diercategorie, laat Figuur 5.2 voor sommige parameters grote verschillen in mediaanwaarden zien voor verschillende diercategorieën. Deze metingen kunnen daardoor niet worden gecombineerd en dienen in de analyse afzonderlijk te worden bekeken.

In Tabel 7 worden de resultaten van een aantal statistische kengetallen (mediaan, gemiddelde, minimum en maximum waarden, standaarddeviatie en 95%-gegevensbereik) weergegeven voor alle onderzochte parameters in de database (concentraties van NH₃, CO₂, PM₁₀, PM_{2,5} en totaalstof in de inkomende en uitgaande stallucht, temperatuur en RV in en buiten de stal), afhankelijk van de diercategorie. Met '95%-gegevensbereik' wordt bedoeld dat tussen de gegeven waarden voor die parameter, 95% van de gemeten waarden liggen (startend vanaf het minimum in de meting). De resultaten laten zien dat de keuze voor een specifiek soort sensor niet alleen afhankelijk is van de eigenschappen van de beschikbare sensoren, maar ook van de locatie van het meetpunt (binnen of buiten de stal) en de diercategorie die bemeten wordt.

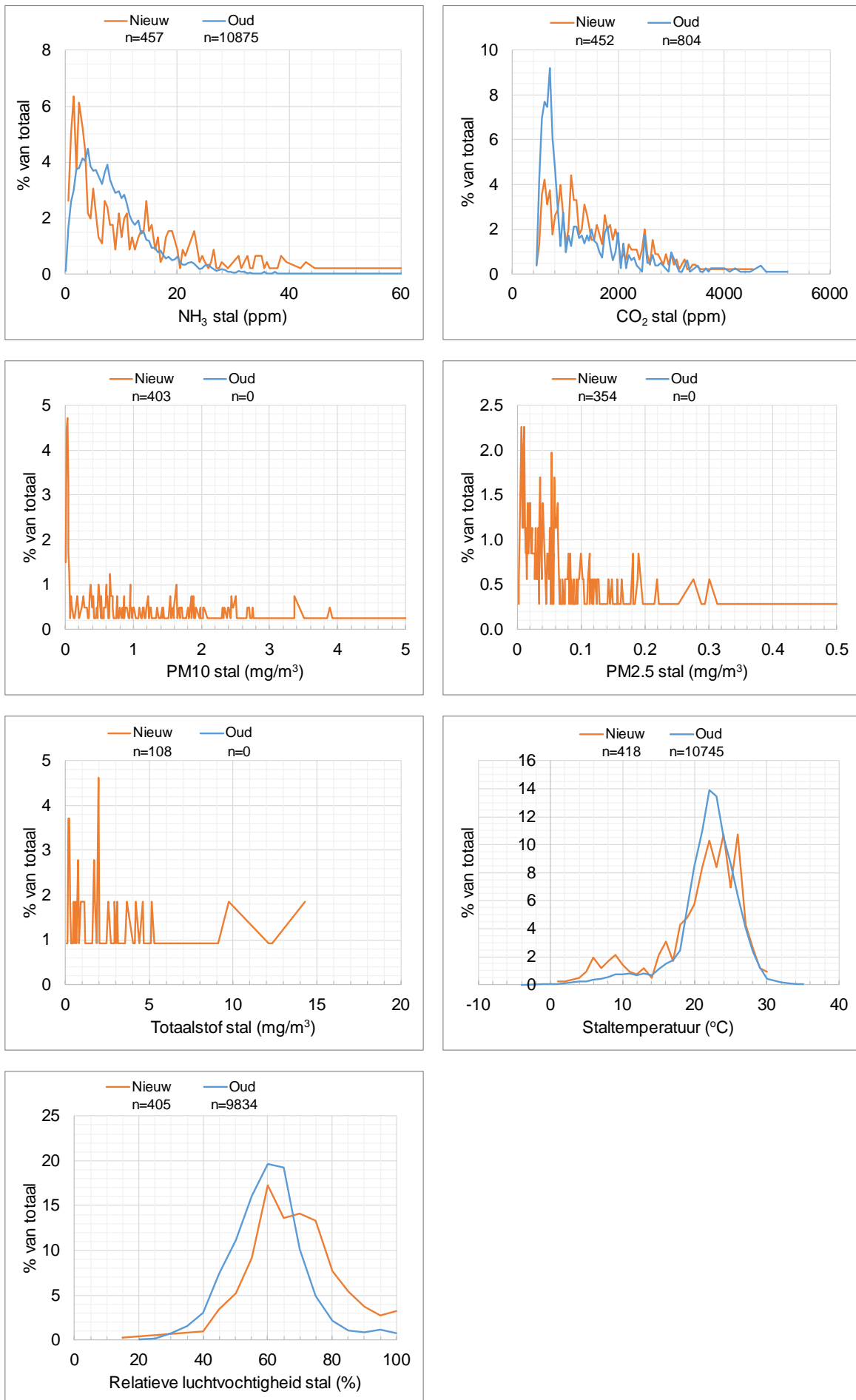
Hiervoor is ingegaan op de meting van concentraties. De emissie vanuit een stal wordt mede bepaald door het ventilatiedebiet. Hierbij is het over het algemeen zo dat bij een toename van het debiet de concentraties in deze lucht lager worden. De bijdrage aan de emissie kan in die situatie echter behoorlijk toenemen. In die situatie is het daarom nodig de concentraties in dit lage bereik betrouwbaar te kunnen registreren.

Naast de in Figuur 5.2 en Tabel 7 genoemde categorieën melkvee, varkens en pluimvee, dient de toepassing van luchtwassers te worden besproken. In principe kan een luchtwasser achter elke mechanisch geventileerde stal worden geplaatst, onafhankelijk van de diercategorie. Aangezien een melkveeststal in de regel natuurlijk wordt geventileerd, wordt hier (tot nu toe) praktisch nooit een luchtwasser toegepast en beperkt de toepassing van luchtwassers zich hoofdzakelijk tot varkensstallen en vanwege de relatief hoge stofconcentraties in mindere mate tot pluimveestallen.

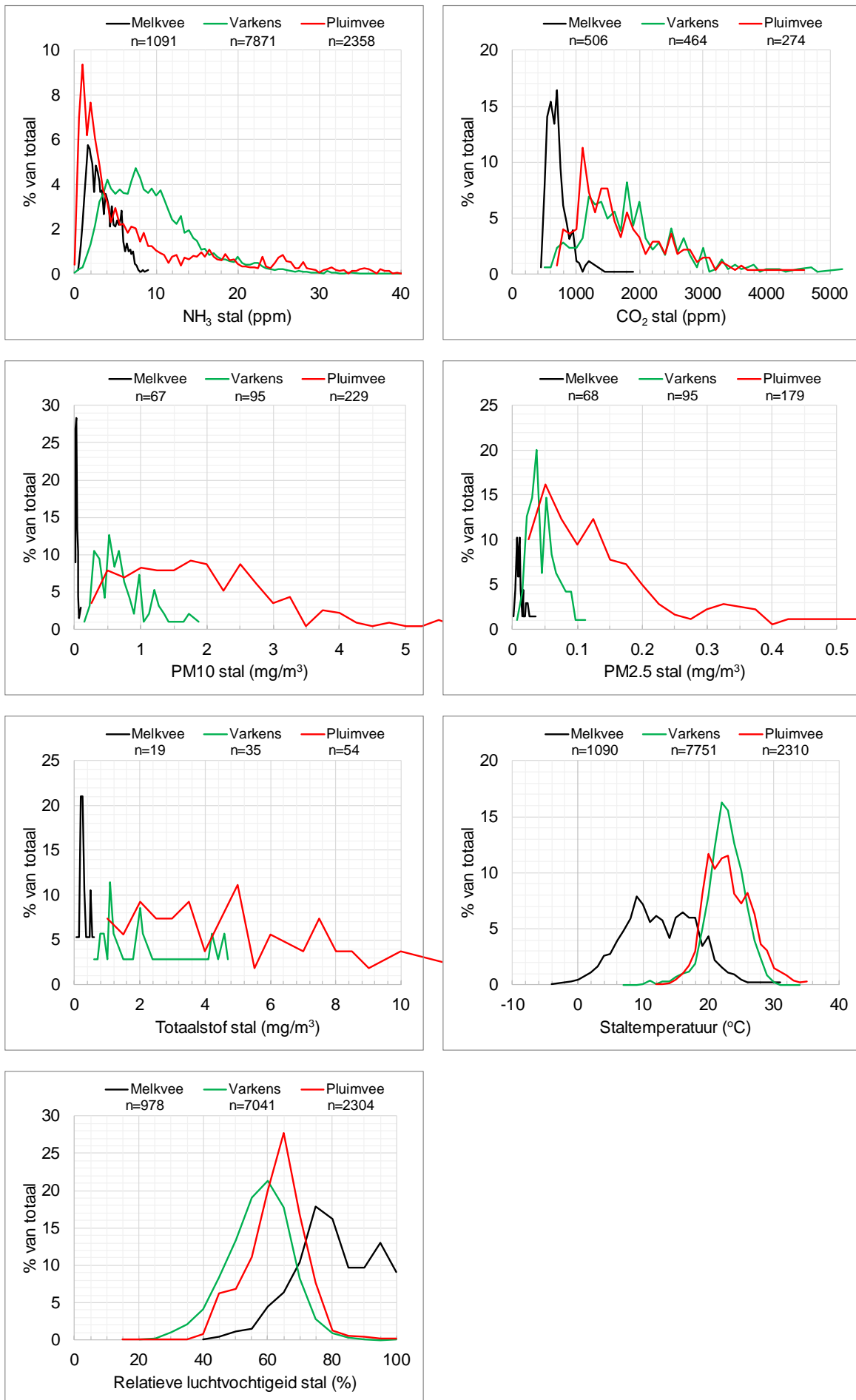
De ingaande lucht van een luchtwasser is de lucht zoals die de stal verlaat: deze lucht heeft de condities zoals in Tabel 7 wordt gegeven als 'uitgaande stallucht' voor de verschillende diercategorieën. In de luchtwasser vindt een reinigingsproces plaats zodat er vanuit mag worden gegaan dat de uitgaande lucht van de luchtwasser een lagere concentratie bevat van NH₃ en fijnstof; aangenomen wordt dat de concentratie van CO₂ weinig tot niet verandert. De RV van de lucht na de luchtwasser neemt toe tot 90-100% en de temperatuur is tot ca. 5°C lager dan de stallucht zelf. De ammoniakverwijdering kan, afhankelijk van het type wasser 70 – 95% bedragen; dit betekent dat de te verwachten NH₃-concentratie na de wasser 70 – 95% lager is dan de getallen die in Tabel 7 worden genoemd als concentratie in de stallucht. Om de emissie na de wasser vast te stellen, betekent dit dat er veel lagere concentraties moeten kunnen worden gemeten dan waarvan in de ingaande lucht voor de wasser sprake is.

In dit rapport wordt de aanvliegroute beschreven om te komen tot het meten van de emissie van een stal (al dan niet uitgerust met een luchtwasser). Het is dan in principe voldoende om alleen de concentratie ná de luchtwasser te meten. Bedacht moet echter worden dat vergelijking van de concentratie voor en na de luchtwasser informatie kan verschaffen met betrekking tot de werking en het al dan niet correct functioneren van de wasser. Er zou daarom gekozen kunnen worden om (in alle gevallen of in specifieke gevallen) zowel de concentratie NH₃ voor als na de luchtwasser te meten. Mogelijk dat het direct meten van de emissie uit luchtwassers in de regelgeving ook ruimte zal scheppen voor luchtwassers waarbij een deel van de tijd niet alle lucht wordt behandeld maar een deel van de lucht via een bypass direct naar buiten wordt geleid. Wanneer de concentraties en debieten van beide luchtstromen worden gemeten, kan ook voor een luchtwasser met bypass de emissie op betrouwbare wijze worden vastgesteld.

Zoals gezegd zal een luchtwasser naast ammoniak ook de emissie van stof verlagen. Op basis van stofemissiefactoren voor luchtwassers, zoals die door het Ministerie van Infrastructuur & Waterstaat (I&W) worden gepubliceerd, kan aangenomen worden dat de PM₁₀-concentratie in de uitgaande stallucht met 35% tot 80% afneemt, afhankelijk van het type luchtwasser.



Figuur 5.1 Verdeling van alle beschikbare waarnemingen voor in de stal gemeten parameters afhankelijk van het toegepaste meetprotocol (oud vs. nieuw protocol)



Figuur 5.2 Verdeling van alle beschikbare waarnemingen voor in de stal gemeten parameters afhankelijk van de diercategorie

Tabel 7 Aantal bemeten locaties, totaal metingen en statistische kenmerken voor een aantal onderzochte parameters in de database (concentraties van NH₃, CO₂, PM₁₀, PM_{2,5} en totaalstof in de inkomende en uitgaande stallucht, temperatuur en RV in en buiten de stal), per diercategorie

Parameter	Diercategorie	#Locaties	#Metingen	Mediaan	Gemiddelde	Stdev	Min	Max	Gegevensbereik (95% alle waarden)
NH ₃ stallucht (ppm)	Melkvee	27	1091	3,0	3,4	1,7	0,4	9,0	[0 : 7]
	Varkens	59	7871	8,5	9,6	5,8	0,0	61,0	[0 : 21]
	Pluimvee	161	2358	4,5	9,7	13,4	0,0	87,0	[0 : 36]
NH ₃ buitenlucht (ppm)	Melkvee	20	428	0,15	0,27	0,37	0,00	4,60	[0 : 1]
	Varkens	36	161	0,15	0,22	0,32	0,05	3,15	[0 : 1]
	Pluimvee	29	272	0,15	0,30	0,62	0,00	5,60	[0 : 2]
CO ₂ stallucht (ppm)	Melkvee	23	506	650	699	169	450	1900	[450 : 1037]
	Varkens	40	464	1800	1903	844	500	5200	[500 : 3590]
	Pluimvee	65	274	1500	1723	702	700	4600	[700 : 3128]
CO ₂ buitenlucht (ppm)	Melkvee	18	105	400	451	114	350	1400	[350 : 679]
	Varkens	31	362	450	478	114	350	1300	[350 : 705]
	Pluimvee	50	170	450	475	68	400	700	[400 : 611]
PM ₁₀ stallucht (mg/m ³)	Melkvee	12	67	0,03	0,03	0,02	0,01	0,10	[0,01 : 0,08]
	Varkens	39	95	0,68	0,73	0,39	0,15	1,88	[0,15 : 1,50]
	Pluimvee	18	229	1,75	2,08	1,45	0,25	11,00	[0,25 : 4,98]
PM ₁₀ buitenlucht (mg/m ³)	Melkvee	12	66	0,015	0,017	0,013	0,000	0,085	[0,00 : 0,04]
	Varkens	35	83	0,020	0,027	0,020	0,005	0,115	[0,01 : 0,07]
	Pluimvee	16	197	0,030	0,047	0,056	0,000	0,515	[0,00 : 0,16]
PM _{2,5} stallucht (mg/m ³)	Melkvee	12	68	0,010	0,011	0,007	0,002	0,036	[0,00 : 0,02]
	Varkens	31	95	0,038	0,046	0,022	0,008	0,113	[0,01 : 0,09]
	Pluimvee	18	179	0,125	0,166	0,212	0,025	2,050	[0,03 : 0,59]
PM _{2,5} buitenlucht (mg/m ³)	Melkvee	12	66	0,005	0,008	0,007	0,000	0,030	[0,00 : 0,02]
	Varkens	27	78	0,010	0,014	0,010	0,000	0,060	[0,00 : 0,03]
	Pluimvee	16	146	0,013	0,014	0,009	0,000	0,055	[0,00 : 0,03]
Totaalstof stallucht (mg/m ³)	Melkvee	4	19	0,3	0,3	0,2	0,1	0,6	[0,05 : 0,61]
	Varkens	12	35	2,0	2,2	1,3	0,6	4,7	[0,60 : 4,85]
	Pluimvee	8	54	4,5	5,2	3,4	1,0	14,5	[1,00 : 12,06]
T stal (°C)	Melkvee	27	1090	12	13	6	-4	31	[2 : 24]
	Varkens	59	7751	23	23	3	7	34	[17 : 28]
	Pluimvee	160	2310	23	23	4	12	35	[16 : 30]
T buiten (°C)	Melkvee	27	1080	8	8	6	6	25	[6 : 21]
	Varkens	55	7739	13	12	7	7	31	[7 : 27]
	Pluimvee	158	2290	14	13	7	7	31	[7 : 27]
RV stal (%)	Melkvee	23	882	80	81	12	40	100	[56 : 105]
	Varkens	59	7041	60	57	10	20	100	[37 : 77]
	Pluimvee	156	2304	65	63	9	15	100	[44 : 81]
RV buiten (%)	Melkvee	23	978	85	81	10	35	100	[60 : 102]
	Varkens	55	7113	80	77	13	30	100	[51 : 103]
	Pluimvee	155	2273	80	81	11	40	100	[58 : 104]

6 Programma van eisen

Om een emissie uit een stal continu te registreren zijn betrouwbare metingen nodig met apparatuur die hiervoor geschikt is. Ook moeten de geregistreeerde waarden juist worden weergegeven. In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de prestatiekenmerken van de sensoren (meetcellen op zich), over hoe waarden moeten worden geregistreerd en welke randapparatuur nodig is voor een goed werkend en betrouwbaar meetsysteem als geheel. Daarnaast zijn de kosten van een totaal meetsysteem ook een belangrijk aspect van een programma van eisen. Hierop wordt echter in dit hoofdstuk niet specifiek ingegaan. Dit zal bij een verdere ontwikkeling van deze markt een belangrijke afweging vormen bij de aanschaf.

6.1 Prestatiekenmerken

Hierna zijn voor het continu registreren van concentraties de belangrijkste prestatiekenmerken voor een sensor weergegeven met daarbij aandachtspunten voor toepassing in stallen.

- Bias;

De bias wordt in het laboratorium vastgesteld met een meerpuntskalibratie. Het is daarbij van belang in ieder geval het nulpunt en de maximaal verwachte concentratie op te nemen, de overige punten worden gelijkelijk over het meetbereik verdeeld. Offsets of lineaire correcties zijn relatief eenvoudig toepasbaar, eerste of hogere graad functies beduidend minder. In deze gevallen varieert namelijk de gevoeligheid over het meetbereik en/of komt een bepaalde sensorrespons met twee of meerdere concentraties overeen.

- Precisie;

Naarmate langer gemeten wordt, vormt precisie een steeds kleiner probleem. Dit komt doordat de willekeurige fouten gaandeweg verder uitmiddelen. Voor monitoringsdoeleinden kan daardoor met mindere precisie genoegen genomen worden.

Rekenvoorbeeld

Bij afwezigheid van het te meten gas, wordt aangenomen dat de detectielimiet de onzekerheid weergeeft. Deze kan zowel positieve als negatieve waarden aannemen en laat zo het effect van ruis zien. Voor de referentiemethode (gaswasfles) is de detectielimiet 0,011 ppm NH₃ (Mosquera *et al.*, in voorbereiding). Onder laboratoriumcondities rapporteerden Melse *et al.* (2016) een detectielimiet van 0,1-0,2 ppm voor een specifieke sensor. Fabrieksopgave voor hetzelfde instrument is 1 ppm en ongeveer halverwege dit bereik werd nog een punt gekozen.

Volgend uit de medianen uit Tabel 7, nemen we aan dat in een natuurlijk geventileerde stal een constante NH₃-concentratie van 3 ppm heerst en in een mechanisch geventileerde 8,5 ppm (in praktijk is er sprake van een duidelijk dagritme). Daarnaast is een hoge waarde (20 ppm) opgenomen, die ongeveer overeenkomt met de 97,5 percentielwaarde bij varkens. Er worden vier scenario's gedefinieerd met verschillende meetonzekerheid, van ± 10, 20, 40 en 100%. Deze komen overeen met de referentie meetmethode (gaswasfles), een 'goede', 'middelmattige' of 'slechte' sensor.

In het rekenvoorbeeld is uitgegaan van een sensor die elke 10 seconden een meetwaarde geeft, ofwel 6 metingen gedurende één minuut, 360 in één uur en 8.460 per dag. Een simulatie met 10 iteraties levert dan de volgende minima en maxima voor minuut-, uur- en dagwaarden (zie Tabel 8).

Hieruit volgt dat de concentratie en daarmee emissie met minder nauwkeurige meetmethoden bij een kortere tijdsresolutie niet exact vastgesteld kan worden, maar mogelijk wel over een langere termijn. Let wel dat effecten die pas na maanden een rol gaan spelen zoals drift en afname in gevoeligheid hierin niet zijn verdisconteerd.

Tabel 8 Rekenvoorbeeld voor een gegeven NH_3 -concentratie en meetonzekerheid: de bijbehorende minimum en maximum gegeven een bepaalde aggregatie (minuut, uur en dag)

Concentratie	Meetonzekerheid	Min-max minuut	Min-max uur	Min-max dag
0 ppm	0,011 ppm	-0,01-0,00	0,00	0,00
	0,15 ppm	-0,05-0,04	-0,02-0,03	0,00
	0,5 ppm	-0,27-0,13	-0,03-0,07	-0,01-0,01
	1 ppm	-0,41-0,32	-0,13-0,11	-0,01-0,01
3 ppm	10%	2,91-3,13	2,96-3,04	3,00
	20%	2,70-3,16	2,89-3,07	3,00
	40%	2,43-3,13	2,86-3,15	3,00-3,02
	100%	2,00-4,25	2,79-3,32	2,97-3,01
8,5 ppm	10%	8,22-8,82	8,40-8,57	8,49-8,50
	20%	7,92-8,79	8,30-8,84	8,48-8,52
	40%	6,45-9,64	7,85-8,80	8,47-8,53
	100%	6,60-11,35	7,26-8,90	8,41-8,54
20 ppm	10%	19,35-20,54	19,73-20,28	19,97-20,05
	20%	18,55-21,54	19,63-20,41	19,98-20,04
	40%	17,12-20,75	18,42-20,65	19,90-20,02
	100%	12,16-23,97	17,74-23,43	19,62-20,30

- Kalibratie;

Er zijn twee type kalibraties die uitgevoerd kunnen worden: op het lab en in het veld. Op het lab wordt een bepaalde concentratie van een doelgas toegevoegd waarna de kalibratieconstanten bepaald worden. In de praktijk is gebleken dat wanneer deze kalibratieconstanten toegepast worden in het veld niet altijd de juiste concentraties volgen. Daarom is het belangrijk ook een kalibratie uit te voeren in het veld. Hierbij wordt de sensor naast (referentie) meetapparatuur geplaatst voor een bepaalde periode (afhankelijk van het concentratiebereik in die periode), waarna de kalibratieconstanten bepaald worden. Kalibreren van elke afzonderlijke sensor in het veld is prijzig. Uit verschillende studies is echter al gebleken dat dezelfde typen sensoren niet altijd hetzelfde gedrag vertonen, wat de noodzaak om elke sensor afzonderlijk te kalibreren verhoogt. Bij de keuze en het testen van verschillende sensoren is het daarom ook van belang naar de prestatie te kijken van een aantal sensoren van hetzelfde type. Een goedkoper alternatief voor een kalibratie is een normalisatie. Hierbij worden meerdere sensoren naast elkaar gezet en genormaliseerd op één van de sensoren. Een juiste absolute concentratie kan op deze wijze echter niet verkregen worden.

- Detectielimiet;

De detectielimiet van een sensor is zeer belangrijk om te bepalen voor welke toepassing deze gebruikt kan worden. Uit hoofdstuk 5.2 blijkt dat de bandbreedte van concentraties verschilt tussen staltypen en diercategorieën. De detectielimiet bepaalt de ondergrens. Het kan zo zijn dat een bepaalde sensor geschikt is in een bepaalde stal en niet in een andere.

- Responstijd;

De gewenste responstijd hangt mede af van hoe snel de concentraties van het doelgas verschillen. Een snelle responstijd is gewenst wanneer de concentraties snel van waarde veranderen. Het type stal kan hier ook een rol bij spelen. Zo zal een stal waarbij de ventilatie gevarieerd wordt een hogere variabiliteit in concentraties laten zien dan wanneer deze constant wordt gehouden.

- Lineariteit van sensorrespons;

Wanneer een sensorrespons lineair is kan een simpele eerste graads kalibratie gebruikt worden. De lineariteit van de sensorrespons heeft ook invloed op de gevoeligheid. Zo zal een sensor met een exponentiële respons gevoeliger zijn voor lagere concentraties dan voor hogere concentraties. Dit maakt dat een 1:1 sensorrespons gewenst is.

- Meetduur;

De geschikte meetduur hangt samen met de variabiliteit van de te meten concentratie en sensoreigenschappen zoals opwarmtijd.

- Meetfrequentie;

Veelal kunnen sensoren iedere seconde de concentratie meten. Het vastleggen van deze waarden geeft echter een (te) grote hoeveelheid data, met ook grote schommelingen. Vanwege het doel van de metingen (zie paragraaf 6.2) lijkt het voldoende om de gemeten waarden te middelen over een periode van vijf minuten en die waarde op te slaan.

-
- Data-aggregatie;
Zoals in bovenstaande rekenvoorbeeld bij precisie al naar voren komt, kan de nauwkeurigheid van een emissieschatting verhoogd worden door een langere data-aggregatie te kiezen.
 - Selectiviteit;
De selectiviteit van een sensor is belangrijk voor metingen in een stal. Over het algemeen worden er verschillende gassen geëmitteerd in een stal. Een sensor die niet selectief is kan dus een onjuiste concentratie weergeven door kruisgevoeligheid. Het is dan ook van belang de selectiviteit van de verschillende sensoren te onderzoeken in stallen zelf.
 - Interferenties;
Met interferenties kan op verschillende manieren worden omgegaan. Als het gedrag van de sensor op interferenties als temperatuur en relatieve vochtigheid bekend is kan hiervoor worden gecorrigeerd. Dit houdt echter wel in dat er een sensor beschikbaar moet zijn die de temperatuur en/of luchtvochtigheid nauwkeurig meet. Voor bepaalde stallen spelen interferenties een grotere rol als voor andere. Zo zal er voor een open stal relatief veel temperatuurvariatie zijn ten gevolge van het seizoen en ook de dagelijkse gang. Voor deze stallen is het dan ook van belang dat de sensor niet gevoelig is voor interferenties van temperatuur of dat hier goed voor gecorrigeerd kan worden.
 - Sensorvergiftiging en verval;
Dit is een zeer belangrijk criterium voor het meten in stallen. In stallen komen veel stoffen voor die sensoren aan kunnen tasten. Hierdoor is het waarschijnlijk nodig de sensor in te bouwen in een behuizing ter bescherming.
 - Concentratiebereik;
De informatie uit hoofdstuk 5.2 kan gebruikt worden om te bepalen in welk concentratiebereik een sensor moet meten. Verschillende typen stallen hebben verschillende concentraties en daarmee kan het ook zo zijn dat in een bepaalde stal van een bepaalde sensor wordt gekozen en een andere voor een andere sensor. Voor de keuze van een sensor is het concentratiebereik dus zeer belangrijk.
 - Drift;
Het is belangrijk het driftgedrag van het sensor-type te kennen, zodat er tijdig voor gecorrigeerd kan worden met nieuwe kalibraties en/of vernieuwing sensors.
 - Nauwkeurigheid tijdstempel;
Als het tijdstempel centraal gegenereerd wordt, is er weinig tot geen risico op een verkeerde interpretatie van (verschillen in) concentraties. Dit is voor een systeem om stalemissies te meten dan ook zeer aan te raden. Voor vergelijking van systemen onderling is het van belang dat tijdstempels uitwisselbaar zijn, dat wil zeggen dat de tijdzone bekend is en er regelmatig gesynchroniseerd wordt met een bekende tijd.
 - Klimaatgevoeligheid;
Zoals in hoofdstuk 5.2 al blijkt is het klimaat zowel in als buiten de stal variabel (de minimum en maximum temperatuur liggen ver uit elkaar, hetzelfde geldt voor RV). Voor stalmetingen is het dan ook van belang dat de sensor niet klimaatgevoelig is, of als wanneer dit wel het geval is hier eenvoudig voor gecorrigeerd kan worden.
 - Datacompleteheid;
Wanneer de data niet volledig compleet is, zal dit invloed hebben op de nauwkeurigheid (immers hoe meer data hoe meer nauwkeurigheid). Hiernaast is het bij stalemissieschattingen ook van belang dat data-uitval willekeurig is. Dit zal er namelijk voor zorgen dat de fout gemaakt door de uitval deels wordt uitgemiddeld. Uitval op eenzelfde tijdstip of specifiek in een bepaald seizoen kan een onder- of overschatting in de berekende emissie tot gevolg hebben.
 - Reactie op stroomuitval;
Dit hangt sterk samen met het punt hierboven. Hoe meer tijd het kost opnieuw juiste metingen te bepalen hoe minder datacompleteheid na stroomuitval. Hiernaast is het ook van belang dat wanneer een sensor niet juist werkt na stroomuitval de data ook ongeldig worden zodat uit onjuiste data geen emissie wordt berekend.
 - Meetonzekerheid;
Is afhankelijk van de precisie en bias-risico (drift). Bij een langere meetduur kan met een lagere precisie genoeg genomen worden, om toch een betrouwbaar gemiddelde te verkrijgen. Onzekerheid als gevolg van systematische afwijkingen door bv. drift worden niet door langere meetduur gecorrigeerd, en moeten goed in kaart worden gebracht bij evaluatie van sensor-types.

6.2 Registratie

Welke eisen zijn er vanuit veehouder en vanuit controle/handhaving? De huidige wet- en regelgeving is gebaseerd op het voldoen aan emissies per dier, doorgerekend naar een totale emissie op bedrijfsniveau. Deze totale emissie wordt via verspreidingsmodellen vertaald naar een belasting. Voor NH_3 is dat de N-depositie per jaar op een natuurgebied, voor geur een piekbelasting (95-percentiel uurwaarden) bij omwonenden en voor PM_{10} de piekconcentratie in de buitenlucht op bepaalde afstanden van het bedrijf. Deze berekeningen worden gedaan voor het verkrijgen van een vergunning voor het in werking hebben van het bedrijf (90-percentiel op dagbasis en jaargemiddeld maximum). Hierop wordt gecontroleerd door na te gaan of de technische voorzieningen zoals omschreven in de vergunning, aanwezig en in gebruik zijn volgens de daarvoor opgestelde beschrijvingen. Er zijn geen mogelijkheden om na te gaan of de emissies (of depositie, belasting of concentratie) overeenkomen met de berekende waarden. Voor de emissies zou dit wel kunnen als via het bedrijfsmeetsysteem met continue registratie deze worden vastgelegd. Voor de depositie, geurbelasting en PM_{10} -concentratie in de buitenlucht is dit niet mogelijk, omdat er veelal meerdere bronnen zijn die invloed uitoefenen op die waarden. Het herleiden van deze gemeten waarden naar een specifieke bron is daarbij niet zonder meer mogelijk.

Zowel voor de veehouder als de controlerende instantie is het belangrijk te weten of er voldaan kan worden aan de in de vergunning vastgelegde (maximale) emissies. Het gaat daarbij voor ammoniak om het totaal per jaar. Voor geur en fijnstof gaat het om piekbelastingen. Voor geur wordt in het verspreidingsmodel gerekend met een gemiddelde emissie. Bij groeiende dieren is er echter een toename van de emissie. Hierdoor is het niet eenvoudig om de emissie aan het eind van de groeiperiode te vergelijken met de toegestane waarden.

Voor het bepalen van de emissiewaarden is het nodig de continue registratie van zowel concentratie als ventilatiedebiet om te rekenen naar een emissie. Voor de controlerende instantie is het dan voldoende om te weten of de maximale emissie per jaar is overschreden (rekening houdend met bepaalde marges). De veehouder zal echter eerder een waarschuwing willen hebben dat de maximale emissie (mogelijk) overschreden gaat worden als er geen maatregelen worden genomen.

Ook moet bedacht worden dat er technieken zijn die eenvoudig aan of uit kunnen worden gezet, zoals bijvoorbeeld een chemische luchtwasser. Wanneer er uiteindelijk gestuurd gaat worden met doelvoorschriften, zoals een maximale ammoniakemissie per jaar, in plaats van een middelvoorschrift - bijvoorbeeld dat de wasser het hele jaar moet aanstaan, alle lucht moet behandelen met een rendement van 90% - is het denkbaar dat het beoogde doel al wordt gehaald voordat het jaar afgelopen is. Voorbeeld: er is sprake van een maximale emissie van 1.200 kg NH_3 /jaar (100 kg per maand) en na het derde kwartaal is er nog maar 600 kg in plaats van 900 kg uitgestoten. De veehouder zou dan kunnen besluiten om de luchtwasser een aantal weken uit te schakelen totdat de cumulatieve emissie weer toegenomen is tot het niveau waarmee hij juist voldoet aan zijn beoogde jaaremmissie. Wat betreft de emissie van ammoniak lijkt dat een acceptabele praktijk vanuit het oogpunt van de veehouder, maar mogelijk dat een dergelijke praktijk wel zou leiden tot het optreden van geuroverlast in de periode dat de luchtwasser is uitgeschakeld. Als het toch altijd ingeschakeld houden van de luchtwasser er toe leidt dat de veehouder een extra emissiereductie voor NH_3 realiseert (dus bovenop zijn verplichting), is het in principe mogelijk om de veehouder hiervoor te belonen. Ook zou een dergelijke emissiereductie verhandeld kunnen worden, zoals bijvoorbeeld ook wordt gedaan met de emissie van CO_2 -equivalenten.

Meer in het algemeen (dus los van de luchtwasser) kan een systeem van directe emissieregistratie een stimulans opleveren om grotere emissiereducties te realiseren dan strikt noodzakelijk is op basis van de vergunning van de veehouder. Op deze wijze schept het toepassen van dergelijke doelvoorschriften dus de mogelijkheid om hogere emissiereducties te realiseren dan wanneer sprake is van middelvoorschriften met (in detail) voorgeschreven technologieën. Het zal dan wel noodzakelijk zijn om hiervoor een geschikte financiële beloningsstructuur te ontwikkelen.

6.3 Randapparatuur

Een sensor (of meetcel) geeft een signaal(-verandering) als de concentratie of waarde van de parameter die wordt gemeten verandert. Dit signaal zal moeten worden omgezet in de eenheid waarin de parameter normaal wordt uitgedrukt, zoals ppm, mg/m³, kg, m³/uur, % of °C. Voor langdurige continue registratie is ook opslag van de waarden nodig, evenals een manier om de waarden te tonen aan de gebruiker. Het meten, opslaan en tonen zal ook op een betrouwbare manier moeten plaatsvinden. Het geheel van technieken om dit te realiseren wordt samengevoegd tot het meetsysteem. Eisen die worden gesteld aan het geheel en aan onderdelen worden hierna kort besproken.

Stroomvoorziening

Een meetcel zelf zal niet altijd energie (stroom) nodig hebben voor het vormen van het signaal, maar de apparatuur om het signaal om te zetten in een leesbare waarde en de opslag van de meetwaarden wel. De energievoorziening zal betrouwbaar moeten zijn en moeten zorgen voor een continu proces. Als het systeem wordt aangesloten op het elektriciteitsnet zullen voorzieningen aanwezig moeten zijn om schommelingen in de netspanning op te vangen. Maar ook een voorziening voor stroomuitval, als op het bedrijf daarvoor geen centraal geplaatste noodvoorziening aanwezig is. Als de sensoren/meetcellen zelf wel spanning nodig hebben, zal het meetsysteem moeten zorgen voor een stabiele en juiste spanning. Denk hierbij ook aan bescherming tegen de invloeden van blikseminslag. Het totale energieverbruik van het meetsysteem moet uiteraard zo laag mogelijk zijn.

Bescherming tegen agressief milieu

De omstandigheden in stallen zijn over het algemeen agressief. De sensoren zullen veelal in (of in de directe nabijheid van) de uitgaande luchtroom worden geplaatst. Voor deze plaats geldt zeker dat het gaat om agressieve omstandigheden. De sensor zal zodanig moeten worden beschermd dat een langere levensduur mogelijk is. Of er moet een mogelijkheid zijn de sensor op een eenvoudige manier te reinigen zonder dat het meetproces hierdoor ernstig wordt verstoord. Algemeen zou kunnen worden gesteld dat minimaal moet worden voldaan aan de eisen van IP44 (spatwaterdicht). Als het meetsignaal zonder verstoringen over een grotere afstand kan worden getransporteerd, is het plaatsen van overige randapparatuur (uitleesmogelijkheid, dataopslag) in een aparte ruimte mogelijk. Apparatuur met een ventilator voor koeling of voor het aanzuigen van te meten lucht verdienen hierbij extra aandacht. Door het aanzuigen van stallucht is er een groot risico op interne vervuiling met alle nadelige gevolgen van dien (uitvallen apparatuur, verkeerde meetwaarden).

Datamanagement en -transport

Zoals aangegeven in paragraaf 5.2 gaat het bij continue emissieregistratie om inzicht in (het niveau en verloop van) de jaarlijkse emissie. Naast de concentraties van de te volgen stof, is ook het ventilatiedebiet nodig om de emissie te kunnen berekenen. De data van beide waarden zullen daartoe via vaststaande formules moeten worden omgerekend. Naast het omrekenen van de data zullen ook de data op een (betrouwbare) manier moeten worden opgeslagen en beschikbaar gesteld voor directe uitlezing en voor bijvoorbeeld jaarrapportages. In het kader van vastleggen van de gegevens als bewijslast, zal een minimale opslagcapaciteit voor 5 jaar nodig zijn.

Als de data ook gebruikt worden voor bewaking van het stalklimaat (eis in Besluit houders van dieren voor vleeskuikens is een maximum van 20 ppm NH₃), moet het systeem ook zo worden ingericht dat alarmering voor overschrijding van deze waarde mogelijk is. Koppeling aan de in de varkens- en pluimveehouderij aanwezig klimaatcomputers is dan een goede optie.

De opslag en bewerking van de data zal meestal plaatsvinden in een centrale unit, waarbij ook meteen de mogelijkheid aanwezig is om de berekende waarden maar ook de basisdata te presenteren. Voor de ondersteuning van de veehouder zijn er op veel bedrijven bedrijfsmanagementsystemen aanwezig op een centrale bedrijfscomputer. In deze systemen wordt al veel informatie opgeslagen over diverse parameters van het bedrijf, waaronder de productiekenmerken (zie tabel 5). Deze centrale bedrijfscomputer kan ook dienen voor de opslag en presentatie van de waarden van de continue emissieregistratie. Voor een betrouwbare opslag van de data in deze centrale bedrijfscomputer zijn tegenwoordig meerdere mogelijkheden beschikbaar, zoals opslag 'in de cloud'.

Om te zorgen dat de gemeten waarden van de sensor niet worden vervormd, moet het transport ervan worden afgeschermd voor beïnvloeding door elektromagnetische velden veroorzaakt door andere op het bedrijf aanwezige apparatuur.

6.4 Validatieprotocol meetsysteem

Op basis van de vorige paragrafen kunnen eisen worden gesteld aan het complete meetsysteem. Een belangrijke factor is het zelfstandig kunnen functioneren van het systeem. Het moet robuust zijn onder alle omstandigheden. Het systeem moet in staat zijn zelf een vorm van kwaliteitsbewaking toe te passen, in de vorm van het tijdig signaleren van afwijkingen, en gecombineerd met een deugdelijk onderhoudsschema. Om hierover voor een compleet meetsysteem duidelijkheid te kunnen geven is het nodig dat de prestaties van het systeem (onder praktijkomstandigheden) wordt gevalideerd door vergelijking met een erkend referentie-meetsysteem. Belangrijke aspecten hierin zijn naast de genoemde robuustheid; risico van interferentie met andere componenten in de stallucht, het driftgedrag van de sensor, de frequentie waarmee controles hierop moeten worden uitgevoerd en de variabiliteit van individuele sensoren van het geëvalueerde type.

Voor de beoordeling van de geschiktheid van meetsystemen voor bedrijfsmonitoring voor regelgeving is het noodzakelijk dat een gestandaardiseerd validatieprotocol wordt opgesteld. De invulling van een dergelijk validatieprotocol kan gebaseerd worden op de aanpak die ontwikkeld is in de RVO-validatieprocedure voor meetmethode NH₃-concentraties in stalemissiemetingen (RVO, 2015) en opgenomen gaat worden in de nieuwe versie van het VERA-meetprotocol 'Huisvestingssystemen' voor NH₃ en CO₂. Om toegelaten te worden als meetmethode voor het vaststellen van emissiefactoren, worden in deze protocollen de referentie-methodes benoemd waartegen meetsystemen moeten worden gevalideerd onder zowel laboratorium- als veldcondities volgens een opzet gebaseerd op NEN-ISO 14793. Voor individuele bedrijfsmonitoring zou een afgeleide variant kunnen worden ontwikkeld met op dit doel aangepaste prestatie-eisen.

7 Antwoorden op de vragen

Hierna wordt op basis van de voorgaande hoofdstukken een antwoord gegeven op de geformuleerde vragen.

- Welke technische eisen moeten er gesteld worden aan een volledig meetsysteem voor stalemissie op een praktijkbedrijf en welke eisen aan de hierin opgenomen meetsensoren en randapparatuur?*

De metingen dienen betrouwbare resultaten op te leveren op basis waarvan veehouder en controlerende instantie inzicht krijgen in het niveau en het verloop van de emissie in verhouding tot de in de vergunning vastgelegde maximale waarde. Voorwaarden daarbij zijn dat het meetsysteem zelfstandig functioneert en beperkt gevoelig is voor verstoringen van buitenaf (zoals vervuiling en stroomuitval). Het meetbereik van de sensoren zal voldoende moeten zijn om concentraties gedurende minimaal 95% van de monitoringstijd te kunnen meten (zie hoofdstuk 5.2) en de randapparatuur zal vooral moeten zorgen voor een veilige opslag van de gemeten data. Benodigd toezicht op drift-risico's van het betreffende meetsysteem, frequenties van herkalibraties en onderhoudseisen dienen omschreven te zijn. Om te kunnen garanderen dat het meetsysteem voor bedrijfsmonitoring hieraan voldoet wordt aanbevolen een validatieprotocol te ontwikkelen geënt op de benadering die in het RVO-validatieprotocol voor NH₃-meetmethoden is uitgewerkt.
- Welke meetsensoren zijn momenteel beschikbaar voor concentratiemetingen: ammoniak (NH₃), fijnstof (PM₁₀ en PM_{2,5}), geur en koolstofdioxide (CO₂)?*

Uit de inventarisatie in deze studie komt naar voren dat er voor NH₃ en CO₂ al sensoren beschikbaar zijn voor toepassing in de stal, die perspectiefvol zijn voor inzet in een bedrijfsmonitoringssysteem. Voor NH₃ zijn (nog) geen sensoren beschikbaar voor buitenluchtmetingen. De 0 ppm als onderkant van het meetbereik die vaak wordt aangegeven door de fabrikanten is niet realistisch en scheidt geen duidelijkheid over de detectiegrens van de sensor. Voor CO₂ zijn wel sensoren beschikbaar die de concentratie buiten nauwkeurig kunnen meten. Sensoren voor langdurige continue meting van PM₁₀-concentratie hebben nog problemen met vervuiling bij hoge concentraties zoals in pluimveestallen. Voor geur is de uitdaging geschikte proxy-gassen per diercategorie vast te stellen, die een goede afspiegeling zijn van de vrijkomende geur in de betreffende situatie.
- Welke aanvullende technische randapparatuur is momenteel beschikbaar voor een bedrijfsmeetsysteem?*

De belangrijkste factor in deze is het betrouwbaar opslaan van de gemeten waarden. Hiervoor zijn goede loggers beschikbaar. Daarnaast ook het voorkomen van dataverlies door stroomuitval. Ook hiervoor zijn betaalbare oplossingen aanwezig.
- In hoeverre voldoen de geïnventariseerde meetsensoren en technische randapparatuur aan het programma van eisen van een meetsysteem voor stalemissie en in welke onderdelen van het programma van eisen wordt momenteel niet voorzien?*

Veel van de genoemde sensoren zullen kunnen voldoen aan de eisen die worden gesteld. Ook randapparatuur zal kunnen voldoen. Belangrijker is echter dat het complete meetsysteem betrouwbare informatie levert. Hiervoor zal het monitoringssysteem integraal moeten worden gevalideerd tegen een referentie-systeem.
- Welke bedrijfsmeetsystemen zijn met beschikbare meetsensoren en randapparatuur op korte termijn realiseerbaar?*

Op basis van de in deze studie verzamelde informatie blijkt dat er nog geen compleet meetsysteem beschikbaar is voor toepassing op stalniveau of bedrijfsniveau. De verwachting is dat dergelijke systemen voor meting van NH₃-verwijderingsrendementen van luchtwassers op korte termijn (ca. 1-2 jaar), en NH₃-emissies uit mechanische geventileerde pluimvee- en varkenstallen op middellange termijn (ca. 2-3 jaar) beschikbaar kunnen zijn. Toepassing in natuurlijk geventileerde stallen wordt eveneens realiseerbaar geacht maar vraagt een complexer systeem en daarmee meer tijd voor ontwikkeling en validatie met referentie-methodes.

Complete meetsystemen voor het meten van de emissies van fijnstof (PM₁₀ en PM_{2,5}) laten nog wat langer op zicht wachten. Matschappelijke en/of politieke druk om de emissie van fijnstof verder terug te dringen kan hier echter mogelijk zorgen voor een versnelling. Dit laatste geldt ook voor andere emissies.

Voor geur zullen eerst goede proxy-gassen moeten worden gevonden die in het veld meetbaar zijn. Hiervoor is fundamenteel onderzoek naar de relatie tussen geurconcentratie (volgens sensorische meetmethode) en geurcomponenten noodzakelijk. Pas wanneer deze zijn vastgelegd voor de verschillende sectoren, zal het ontwikkelen van een compleet meetsysteem mogelijk worden.

6. *Welke technische ontwikkelingen zijn noodzakelijk om tekortkomingen in het programma van eisen op te lossen, welke zijn hierbij perspectiefvol, en wat zijn de aanbevelingen voor het ondersteunen en versnellen van perspectievolle ontwikkelingen?*

Om te komen tot betrouwbare meetsystemen is het belangrijkste element te zorgen dat er een validatieprotocol wordt ontwikkeld, waarmee richting ontwikkelaars duidelijke voorwaarden voor prestatie-eisen worden vastgelegd. Systemen getest volgens dit protocol zijn dan in staat betrouwbare informatie over de geregistreerde emissies te genereren. Ontwikkelingen kunnen verder versneld worden door het uitzetten van pilot-systemen in de verschillende diercategorieën waarmee door veehouders en toezichthouders ervaring kan worden opgedaan. De meetnauwkeurigheid, kwaliteitsborging en onderhoudsschema's kunnen binnen deze pilots worden getoetst. Lessen hieruit kunnen worden benut voor grootschalige toepassing van bedrijfsmonitoring.

Literatuur

- City Technology website: www.citytech.com (bezoekt op 15 oktober 2017).
- Fine, G.F., Cavanagh, L.M., Afonja, A., Binions, R., 2010. Metal oxide semi-conductor gas sensors in environmental monitoring. *Sensors*, 10(6), 5469-5502.
- Gibson, D., MacGregor, C., 2013. A novel solid state non-dispersive infrared CO₂ gas sensor compatible with wireless and portable deployment. *Sensors*, 13(6), 7079-7103.
- Hodgkinson, J., Smith, R., Ho, W.O., Saffell, J.R., Tatam, R.P., 2013. Non-dispersive infra-red (NDIR) measurement of carbon dioxide at 4.2 µm in a compact and optically efficient sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 186, 580-588.
- Hofschreuder, P., Zhao, Y., Aarnink, A.J.A., Ogink, N.W.M., 2008. Measurement protocol for emissions of fine dust from animal houses: considerations, draft protocol and validation. Lelystad, Wageningen UR Livestock Research, Rapport 134.
- Mead, M.I., Popoola, O.A.M., Stewart, G.B., Landshoff, P., Calleja, M., Hayes, M., Baldovi, J.J., McLeod, M.W., Hodgson, T.F., Dicks, J., Lewis, A., Cohen, J., Baron, R., Saffell, J.R., Jones, R.L., 2013. The use of electrochemical sensors for monitoring urban air quality in low-cost, high-density networks. *Atmospheric Environment*, 70, 186-203.
- Melse, Roland W.; Johan P.M. Ploegaert; Nico W. M. Ogink, 2016. Laboratory tests of Draeger Polytron 8000 with FL-6813260 sensor for NH₃ measurement. Wageningen UR (University & Research centre) Livestock Research, Livestock Research Report 972.
- Mosquera, J., J.P.M. Ploegaert, G.M. Nijeboer, J.M.G. Hol, R.W. Melse, N.W.M. Ogink, 2017. Onderzoek naar de nauwkeurigheid van een nieuw type sensor voor ammoniakconcentraties in stallucht; . Wageningen Livestock Research, Rapport 1042.
- Membrapor website: www.membrapor.ch (bezoekt op 15 oktober 2017).
- Mosquera, J., J.P.M. Ploegaert & G.C.C. Kupers (in voorbereiding). Determination of ammonia concentrations from agricultural sources – Reference method using gas washing. Wageningen Livestock Research, Wageningen.
- Pogfay, T., Watthanawisuth, N., Pimpao, W., Wisitsoraat, A., Mongpraneet, S., Lomas, T., Sangworasil, M., Tuantranont, A., 2010. Development of Wireless Electronic Nose for Environment Quality Classification. ECTI-CON2010: The 2010 ECTI International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology. 19-21 mei 2010, Chiang Mai, Thailand.
- Rai, A.C., Kumar, P., Pilla, F., Skouloudis, A.N., Di Sabatino, S., Ratti, C., Yasar, A., Rickerby, D., 2017. End-user perspective of low-cost sensors for outdoor air pollution monitoring. *Science of the Total Environment*, 607, 691-705.
- Sintrol website: <http://www.airdusco.com/wp-content/uploads/2014/02/Sintrol-Dust-Monitors-Presentation.pdf> (bezoekt op 19 januari 2018).
- Resource, 2018. Zes ton voor ontwikkeling gassensor. *Resource*, 8-2-2018, nr. 12, p.8.
- SGX Sensortech website: www.sgxsensortech.com (bezoekt op 15 oktober 2017).
- Spinelle, L., Gerboles, M., Villani, M.G., Aleixandre, M., Bonavitacola, F., 2017a. Field calibration of a cluster of low-cost commercially available sensors for air quality monitoring. Part B: NO, CO and CO₂. *Sensors and Actuators B: Chemical*, volume 238, januari 2017, 706-715.
- Spinelle, L., Gerboles, M., Kok, G., Persijn, S., Sauerwald, T., 2017b. Review of Portable and Low-Cost Sensors for the Ambient Air Monitoring of Benzene and Other Volatile Organic Compounds. *Sensors* 2017, 17(7), 1520.
- Stetter, J.R., Li, J. 2008. Amperometric gas sensors a review. *Chemical reviews*, 108(2), 352-366.
- RVO, 2015. Validatieprocedure voor het testen van de gelijkwaardigheid van alternatieve NH₃ – concentratie meetmethoden voor stalemissiemetingen <https://www.rvo.nl/sites/default/files/2015/09/Validatieprocedure%20NH3%20RVO%2031-08-2015.pdf> (benaderd maart 2018)
- Thorne, P.S., Ansley, A., Perry, S.S., 2009. Concentrations of Bioaerosols, Odors and Hydrogen Sulfide Inside and Downwind from Two Types of Swine Livestock Operations. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 2009 Apr; 6(4): 211-220.

-
- Vermeer, H.M., Hopster, H., 2017. Signaalindicatoren bij handhaving "Open Normen" voor dierenwelzijn; Pilot klimaat in varkensstallen. Wageningen University & Research -Livestock Research, Livestock Research Rapport 1017.
- Wang, C., Yin, L., Zhang, L., Xiang, D., & Gao, R., 2010. Metal oxide gas sensors: sensitivity and influencing factors. *Sensors*, 10(3), 2088-2106.
- Williams, D.E., 1999. Semiconducting oxides as gas-sensitive resistors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 57(1), 1-16.
- Williams, R., Kilaru, V., Snyder, E., Kaufman, A., Dye, T., Rutter, A., Russell, A., Hafner, H., 2014a. Air Sensor Guidebook. EPA/600/R-14/159. U.S. EPA, Research Triangle Park, NC, USA.
- Williams, R., Kaufman, A., Hanley, T., Rice, J., Garvey, S., 2014b. Evaluation of Field-deployed Low Cost PM Sensors. EPA/600/R-14/464. U.S. EPA, Research Triangle Park, NC, USA.
- Williams, R., Kaufman, A., Garvey, S., 2015. Next Generation Air Monitor (NGAM). VOC Sensor Evaluation Report. EPA/600/R-15/122. U.S. EPA, Research Triangle Park, NC, USA.
- Yasuda, T., Yonemura, S., Tani, A., 2012. Comparison of the Characteristics of Small Commercial NDIR CO₂ Sensor Models and Development of a Portable CO₂ Measurement Device. *Sensors* 2012, 12, 3641-3655.

To explore
the potential
of nature to
improve the
quality of life



Wageningen Livestock Research Postbus 338
6700 AH Wageningen
T 0317 48 39 53
E info.livestockresearch@wur.nl [www.wur.nl/
livestock-research](http://www.wur.nl/livestock-research)

Wageningen Livestock Research ontwikkelt kennis voor een zorgvuldige en renderende veehouderij, vertaalt deze naar praktijkgerichte oplossingen en innovaties, en zorgt voor doorstroming van deze kennis. Onze wetenschappelijke kennis op het gebied van veehouderijsystemen en van voeding, genetica, welzijn en milieu-impact van landbouwhuisdieren integreren we, samen met onze klanten, tot veehouderijconcepten voor de 21e eeuw.

De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen 9 gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research en Wageningen University hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 6.500 medewerkers en 10.000 studenten behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.

