



Quick scan sensortechnologie voor monitoring luchtkwaliteit en emissies in de veehouderij

Marien Korevaar, Albert Winkel

Rapport 1386



WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH

Quick scan sensortechnologie voor monitoring luchtkwaliteit en emissies in de veehouderij

Marien Korevaar, Albert Winkel

Wageningen Livestock Research

Dit onderzoek is uitgevoerd door Wageningen Livestock Research en gesubsidieerd door het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, in het kader van het Beleidsondersteunend onderzoek thema Kennisdesk D1 emissiereductie methaan veehouderij (projectnummer BO-43-105-000).

Wageningen Livestock Research
Wageningen, oktober 2022

Rapport 1386

Korevaar, M., A. Winkel, 2022. *Quick scan sensortechnologie voor monitoring luchtkwaliteit en emissies in de veehouderij*. Wageningen Livestock Research, Openbaar Rapport 1386.

Ter ondersteuning van beleidsontwikkeling is in dit rapport, in opdracht van het ministerie van LNV, samengevat wat de stand van zaken is rondom de ontwikkeling en toepassing van sensortechnologie voor monitoring van luchtkwaliteit en emissies in de veehouderij. Ingegaan wordt op de beschikbaarheid en stand van techniek van sensoren, mogelijkheden om sensortechnologie in te zetten als managementtool voor veehouders en emissie-monitoring, bestaande protocollen en certificeringen aangaande emissie-monitoring, en benodigd onderzoek en ontwikkeling in de toekomst.

To support policy making, this report was commissioned by the ministry of Agriculture, Nature and Food quality. It summarizes the current status regarding the development and application of sensors for air quality and air emissions in livestock farming. This report deals with the availability and state of technology of sensors, possibilities to use sensors as a management tool for livestock farmers as well as for emission monitoring, existing protocols and certification schemes regarding emission monitoring, and research and development needed in the future.

Dit rapport is gratis te downloaden op <https://doi.org/10.18174/575873> of op www.wur.nl/livestock-research (onder Wageningen Livestock Research publicaties).



Dit werk valt onder een Creative Commons Naamsvermelding-Niet Commercieel 4.0 Internationaal-licentie.

© Wageningen Livestock Research, onderdeel van Stichting Wageningen Research, 2022

De gebruiker mag het werk kopiëren, verspreiden en doorgeven en afgeleide werken maken. Materiaal van derden waarvan in het werk gebruik is gemaakt en waarop intellectuele eigendomsrechten berusten, mogen niet zonder voorafgaande toestemming van derden gebruikt worden. De gebruiker dient bij het werk de door de maker of de licentiegever aangegeven naam te vermelden, maar niet zodanig dat de indruk gewekt wordt dat zij daarmee instemmen met het werk van de gebruiker of het gebruik van het werk. De gebruiker mag het werk niet voor commerciële doeleinden gebruiken.

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.

Wageningen Livestock Research is NEN-EN-ISO 9001:2015 gecertificeerd.

Op al onze onderzoeksopdrachten zijn de Algemene Voorwaarden van de Animal Sciences Group van toepassing. Deze zijn gedeponeerd bij de Arrondissementsrechtbank Zwolle.

Openbaar Wageningen Livestock Research Rapport 1386

Inhoud

Samenvatting	5
1 Inleiding	7
1.1 Achtergrond	7
1.2 Aanleiding en doel	7
1.3 Kernvragen in dit rapport	7
1.4 Termen en definities in dit rapport	8
2 Sensortechnologie voor luchtkwaliteit en luchtemissies	9
2.1 Emissie = luchtdebiet × luchtconcentratieverschil	9
2.2 Meetmethode versus meetstrategie	9
2.3 Mogelijkheden monitoren luchtdebiet door stalgebouw	10
2.4 Mogelijkheden monitoren stalluchtconcentratie	10
2.4.1 Algemene bedenkingen	10
2.4.2 Ammoniak (NH ₃)	11
2.4.3 Geur	11
2.4.4 Fijnstof (PM ₁₀ , PM _{2,5})	11
2.4.5 Methaan (CH ₄)	12
2.4.6 Koolstofdioxide (CO ₂)	12
2.5 Mogelijkheden monitoren achtergrondconcentratie	13
3 Protocollen en certificering	14
3.1 Veehouderij	14
3.2 Industrie	14
3.2.1 Andere industrieën	14
3.2.2 IPPC-installaties en type C inrichtingen met controleregime 4	15
3.2.3 Toepassing veehouderij	17
4 Toepassingsaspecten emissie monitoring	18
4.1 Drie doelniveaus voor inzet van sensortechnologie	18
4.2 Emissie monitoringstechniek versus managementtool	18
4.3 Betrouwbaarheid sensoren voor emissie monitoring	19
4.4 Kostenniveau van emissie monitoring	20
4.4.1 Investeringskosten	20
4.4.2 Vervanging meetcel	21
4.4.3 Referentiemetingen en controle	21
4.5 Actoren en rollen bij emissie monitoring	21
4.6 Handhaving	22
5 Verder onderzoek en ontwikkeling	23
5.1 Meetmethode en -strategie	23
5.2 Pilots, proeftuinen of fieldlabs	24
Literatuur	25
Bijlage 1 Overzicht ammoniaksensoren	29
Bijlage 2 Overzicht fijnstofsensoren	31
Bijlage 3 Overzicht methaansensoren	33



Samenvatting

Bij het bepalen van de emissies uit de stal spelen er twee aspecten een rol: meetmethode en meetstrategie. Een meetmethode is de wijze waarop luchtconcentraties worden gemeten of het ventilatiedebiet wordt gemeten. De meetstrategie beschrijft waar, wanneer en hoe vaak er met voornoemde meetmethode wordt gemeten om tot een meetresultaat te komen dat passend is bij het doel van de metingen.

Bij het protocollair meten of continu monitoren van emissies is de methode om het ventilatiedebiet te bepalen even belangrijk als de toegepaste methode om de concentraties van stoffen te meten. Zowel in gesloten als open stallen verandert het ventilatiedebiet continu, onder invloed van het weer of omdat het wordt afgestemd op de klimaatbehoefte van dieren. Van de onderzochte methodes zijn alleen de CO₂-tracer-ratiomethode en het gebruik van meetwaaiers op de ventilatoren in gesloten stallen voldoende accurate methoden voor emissie monitoring gebleken.

Om de emissie betrouwbaar te kunnen monitoren is het noodzakelijk dat de gasconcentratie in de uitgaande lucht met een sensor accuraat gemeten kan worden. Bij langdurige continue metingen zal vooral de systematische meetfout van de sensor van belang zijn. De sensoren kunnen hiervoor niet uitsluitend in het laboratorium worden getest aangezien de stalomstandigheden de meetprestatie van de sensor kunnen beïnvloeden. Deels kunnen eventuele systematische fouten ondervangen worden met een eenmalige kalibratie van de sensor onder praktijkomstandigheden, maar een systematische fout kan ook veranderen gedurende de gebruikperiode en daarom zal het nodig zijn om de sensor periodiek te vervangen of met een zekere frequentie te blijven kalibreren. De duur tussen vervanging en kalibraties is afhankelijk van het type sensor dat wordt toegepast en de meetonzekerheid die geaccepteerd wordt.

Er zijn voor zover bekend nog geen protocollen of certificeringssystemen ontwikkeld specifiek voor emissie monitoring in stallen. Veel van de basisprincipes en voorschriften uit voornoemde meetprotocollen zijn ook geldig en toepasbaar bij emissie monitoring. Door WUR, TNO en RIVM is een ontwikkel- en validatieprotocol opgesteld voor ammoniak- en methaansensoren in de veehouderij (Vonk et al., 2021), waarmee kan worden aangetoond dat een sensor gelijkwaardig is aan de referentiemethode en dus toegepast kan worden voor emissie monitoring in de context van doelvoorschriften. Daarnaast zijn er voor de industrie protocollen ontwikkeld om met periodieke of continue metingen aan te tonen dat aan emissiegrenswaarden wordt voldaan, die deels toepasbaar zijn in de veehouderij.

In het programma 'Integraal aanpakken' is er ruim 2 jaar continu gemeten in 13 melkvee-, 2 melkgeiten-, 2 rosé vleeskalveren- en 3 varkensstallen. Voor de toegepaste meetmethode en meetstrategie geldt dat de jaargemiddelde emissie in gesloten stallen op basis van de continue metingen niet significant afwijkt van de jaargemiddelde emissie op basis van de referentiemetingen. In gesloten stallen is het ook eenvoudiger om de emissie te bepalen doordat het verschil tussen de stal- en achtergrondconcentratie groter is en het ventilatiedebiet eenvoudiger bepaald kan worden. In de open melkveestallen is er nog wel sprake van een verschil tussen continue metingen en referentiemetingen dat groter is dan aanvaardbaar volgens het ontwikkel- en validatieprotocol. In het protocol wordt wel benadrukt dat de uiteindelijke keus voor de te hanteren criteria, en daarmee samenhangende onzekerheid, een beleidsmatige keuze is.

Voor ammoniak geldt dat er inmiddels sensoren zijn die uitgebreid toegepast zijn in de stalomgeving en die bruikbaar blijken en in de low-cost categorie vallen. Voor methaan wordt op dit moment onderzoek gedaan in de stalomgeving naar de meetprestatie van een sensor met lagere aanschafkosten dan 5.000 euro. Op basis van het onderzoek in het laboratorium zou deze sensor geschikt zijn om het methaanniveau in de stal accuraat te meten. Voor fijnstof en geur geldt dat ook voor wetenschappelijke doeleinden nog geen continue meetmethodes zijn ontwikkeld of geschikt bevonden.

De concentratiemetingen van ammoniak, koolstofdioxide en fijnstof kunnen waardevol zijn voor de bedrijfsvoering en dan met name in de sectoren waar deze stoffen zich in concentraties voor kunnen doen die invloed hebben op de gezondheid en de technische resultaten van de dieren. Dit is bij varkens, leghennen, vleeskuikens, vleeskalveren en melkgeiten het geval. Wat betreft concentraties van methaan en geurcomponenten is er in geen enkele sector sprake van niveaus die relevant zijn voor het dierwelzijn. De CO₂-concentratie die gemeten wordt om het ventilatiedebiet te bepalen levert waardevolle informatie over

het stalklimaat evenals secundaire metingen als temperatuur en luchtvochtigheid. Inzicht in de methaanconcentratie kan wel waardevol zijn als waarschuwing voor explosiegevaar wat in de mestkelder voor kan komen. Het meten van methaan kan ook als proxy dienen voor andere gassen die gevaarlijk zijn in de stal voor mens of dier, zoals waterstofsulfide.

Voor alle meetmethodes geldt dat de kosten en de nauwkeurigheid ook afhankelijk zijn van de meetstrategie. De gewenste nauwkeurigheid van de sensoren hangt af van het doel/niveau waarvoor de sensoren worden toegepast.

De minimale inspanning benodigd om de meetprestatie van de sensor te waarborgen moet beter worden onderzocht evenals de hoeveelheid referentiemetingen die minimaal benodigd is en de mogelijkheid om met zero- en spanchecks de meetprestaties te waarborgen. In de projecten die aan de orde komen in dit rapport is vooral aandacht geweest voor de technische aspecten van het meten met sensoren en de presentaties ervan ten aanzien van andere meetmethodes. In deze projecten is nog geen aandacht gegeven aan juridische aspecten, sociale aspecten en het datagebruik van emissie-monitoring in de context van doelvoorschriften.

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Stalgebouwen leveren via hun ventilatie een bijdrage aan ammoniakdepositie, methaanuitstoot, geurhinder en fijnstofblootstelling in de leefomgeving. Om negatieve effecten op de leefomgeving te voorkomen bestaat er een geheel van wetten en regels waarin stalemissies worden gereguleerd. Die regulering is grotendeels gebaseerd op 'middelvoorschriften'. Deze schrijven voor dat emissiearme huisvestingssystemen en/of emissiereducerende technieken gebruikt moeten worden. Daarbij hebben deze systemen 'forfaitaire' (d.w.z. generiek veronderstelde) emissiewaarden. Emissiewaarden komen tot stand op basis van geprotocolleerde metingen aan twee (bij case-control metingen) of vier bedrijfslocaties met het betreffende systeem. De rol van (niet-technische) voer- en managementmaatregelen in regulering van stalemissies is beperkt. De laatste jaren worden de nadelen van deze middelvoorschriftenregulering steeds prominenter geuit (Oostdijk en Maas, 2014; Kort et al., 2020; Taskforce Versnelling Innovatieproces Stalsystemen, 2021). Zo is de variatie in emissie tussen veehouderijbedrijven met identieke inrichtingen fors, o.a. door verschillen in bedrijfsmanagement, wat zich vertaalt in een grote mate van onzekerheid in berekende deposities en concentraties rond bedrijven. Ook hebben noch het bevoegd gezag noch veehouders zelf inzicht in de werkelijke emissies en bestaan er voor veehouders nauwelijks mogelijkheden om met management te sturen op lagere emissies en daarvoor te worden beloond. Door de snelle ontwikkelingen in sensortechnologie wordt het mogelijk om realtime en continu luchtconcentraties en luchtmissies op veehouderijbedrijven te monitoren. Daarmee wordt het ook mogelijk om in de toekomst luchtmissies te reguleren via doelvoorschriften. Onder doelvoorschriften verstaan we een doel of van dat doel afgeleide norm die gesteld wordt, waarbij er keuzevrijheid is hoe dit wordt behaald. Met een meetsysteem op basis van sensoren wordt gemonitord of dit doel wordt bereikt. Het staat de veehouder vrij met welke middelen hij dit doel realiseert. Dit kan met een combinatie van enerzijds technieken (huisvestingssystemen en emissiereducerende technieken) en anderzijds voer- en managementmaatregelen.

1.2 Aanleiding en doel

Door de veehouderijsector, het bedrijfsleven, de wetenschap en de overheden wordt regulering van luchtmissies uit veehouderijen via emissie monitoring gezien als een perspectiefvolle ontwikkelrichting. Het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit (LNV) verkent op dit moment of een programma opgezet kan worden om ontwikkeling van deze nieuwe vorm van regulering te stimuleren, te coördineren en lopende en toekomstige projecten enerzijds en beleidsambities anderzijds op elkaar af te stemmen. Ter ondersteuning hiervan heeft het ministerie van LNV aan Wageningen Livestock Research (WLR) via de zogenaamde LNV Kennisdesk gevraagd een quick scan uit te voeren van de stand van zaken rond sensortechnologie voor luchtkwaliteit en luchtmissies in de veehouderij aan de hand van een aantal vragen.

1.3 Kernvragen in dit rapport

In de hoofdstukken van het rapport wordt informatie op een rij gezet die een antwoord schetst op onder andere de volgende vragen die door het ministerie van LNV zijn gesteld:

1. Welke onderzoeken rondom sensoren zijn er tot nu toe geweest, met welk doel zijn deze uitgevoerd en wat zijn de belangrijkste conclusies en aanbevelingen?
2. Welke protocollen en/of certificeringssystemen zijn al ontwikkeld voor (publiek of privaat) toezicht?

3. Welke sensoren zouden nu technisch gezien al ingezet kunnen worden, voor welke toepassing, en welke eigenschappen hebben deze sensoren? Met onderscheid tussen emissies van ammoniak, methaan, fijnstof en geur uit zowel open, halfopen als gesloten stallen.
4. Welke mogelijkheden bestaan er voor het gebruik van sensoren voor zowel het bedrijfsmanagement voor de veehouder (en zijn adviseurs) en vergunningverlening?
5. Wat is er nog nodig aan aanvullend onderzoek naar of ontwikkeling van sensor- en datasystemen om deze in te zetten voor doelvoorschriftenregulering?

1.4 Termen en definities in dit rapport

In onderstaande tabel staan de definities weergegeven van enkele termen zoals die in dit rapport gebruikt worden.

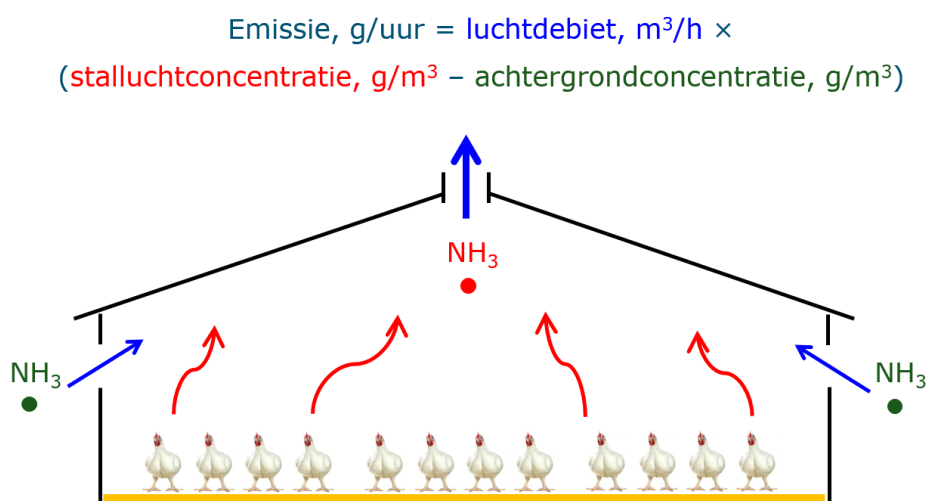
Tabel 1.1 Termen en hun definities zoals gehanteerd in dit rapport.

Term	Definitie
Meetcel	Het basiselement in een sensor dat een elektronisch signaal afgeeft waaruit de concentratie van de te meten stof valt af te leiden
Sensor	Het instrument dat bestaat uit een meetcel, de behuizing en de elektronische apparatuur die het signaal verwerkt
Datalogger	Het instrument dat het (bewerkte) signaal van de sensor of monitor opslaat en eventueel verzendt. Een datalogger kan een apart instrument zijn waar een sensor of monitor op wordt aangesloten, het kan ook geïntegreerd zijn in de sensor of monitor
Meetsysteem	Een volledig systeem dat bestaat uit de sensor (meetcel, behuizing en signaalverwerkingsapparatuur), apparatuur dat elektrische voeding geeft, en apparatuur dat het (bewerkte) signaal opslaat of verzendt
Gesloten stal	Stalgebouw waarin het stalklimaat volledig door mechanische ventilatie wordt gereguleerd in combinatie met specifieke openingen voor luchtinlaat en luchtuitlaat
Halfopen stal	Stalgebouw waarin het stalklimaat hoofdzakelijk door mechanische ventilatie wordt gereguleerd, maar ook wordt beïnvloed door openingen die bedoeld zijn voor vrije uitloop van dieren
Open stal	Stalgebouw waarin het stalklimaat hoofdzakelijk door natuurlijke ventilatie wordt beïnvloed
Meetonzekerheid	De spreiding van waarden die worden veroorzaakt door toeval en toegewezen kunnen worden aan de bemeeten kwantiteit. Deze parameter heeft een statistische basis en kan uitgedrukt worden als standaardafwijking of in een betrouwbaarheidsinterval. Deze fout wordt ook aangeduid als 'toevalsfout' of 'random error'.
Meetfout	Het verschil tussen een individuele meetwaarde en de onbekende werkelijke waarde. Dit verschil bestaat voor een deel uit de meetonzekerheid, maar ook uit systematische fouten en niet-systematische fouten
Systematische fout	Het verschil tussen het gemiddelde van gerepliceerde metingen en de verwachte (werkelijke) waarde. Deze fout wordt ook aangeduid als 'bias'. Deze fout bepaalt de accuraatheid (juistheid) van het meetsysteem en moet waar mogelijk gecorrigeerd worden door bijvoorbeeld kalibratie
Niet systematische fout	Oorzaak van een niet valide meting: een niet juist uitgevoerde of verlopen meting

2 Sensortechnologie voor luchtkwaliteit en luchtemissies

2.1 Emissie = luchtdebiet × luchtconcentratieverschil

De emissie van een stof uit een stalgebouw wordt berekend door het luchtdebiet (=ventilatie-debiet) te vermenigvuldigen met het verschil tussen de gemeten concentratie van de stof in de lucht die de stal verlaat (=stalluchtconcentratie) en de lucht die de stal binnenstroomt (=achtergrondconcentratie). De emissie is de hoeveelheid van de stof uit die per tijdseenheid (en eventueel eenheid van productie, zoals dier of dierplaats) de atmosfeer in stroomt. Het is daarmee een snelheid of 'rate'. De reden dat de achtergrondconcentratie van de stalluchtconcentratie moet worden afgetrokken is dat dit een hoeveelheid van de stof is dat reeds aanwezig was in de buitenlucht: het ventilatiesysteem van het stalgebouw geeft deze hoeveelheid alleen maar door. Dit is schematisch weergegeven in Figuur 2.1. Hieruit volgt dat voor emissie-monitoring, net als bij protocollaire meetcampagnes, drie variabelen nodig zijn: a) het luchtdebiet, b) de concentratie van de stof in de uitgaande lucht, en c) de concentratie van de stof in de binnenstromende lucht. In de volgende paragrafen wordt beschreven op welke manieren deze variabelen gemeten kunnen worden.



Figuur 2.1 Schematische weergave van de berekening van emissie, in dit voorbeeld van de gasvormige stof ammoniak (NH_3).

2.2 Meetmethode versus meetstrategie

Bij het bepalen van de emissie zoals schematisch weergegeven in Figuur 2.1 spelen er twee aspecten een rol: meetmethode en meetstrategie. Een meetmethode is de wijze waarop luchtconcentraties worden gemeten. De meetstrategie beschrijft waar, wanneer en hoe vaak er met voornoemde meetmethode wordt gemeten om tot een meetresultaat te komen dat passend is bij het doel van de metingen. In dit hoofdstuk wordt ingegaan op meetmethoden.

2.3 Mogelijkheden monitoren luchtdebiet door stalgebouw

Bij het protocollair meten of continu monitoren van emissies is de methode om het ventilatiedebiet te bepalen even belangrijk als de toegepaste methode om de concentraties van stoffen te meten. Aangezien het ventilatiedebiet in de stal wordt afgestemd op de klimaatbehoefte van de dieren, verandert het ventilatiedebiet continu. Het ventilatiedebiet in mechanisch geventileerde stallen bijvoorbeeld, neemt toe met de leeftijd van de dieren en de buitentemperatuur zodat karakteristieke patronen in de tijd bestaan: over groeirondes, over dag/nacht en over seizoenen. Dit is een belangrijk verschil met luchtdebieten in de industrie die vaak aan/uit zijn en van een vast niveau. In tabel 2.1 wordt een overzicht weergegeven van de voornaamste onderzochte methodes voor het bepalen van het ventilatiedebiet die kunnen worden toegepast in gesloten of (half)open stallen. De methodes die geschikt zijn voor open stallen kunnen ook worden toegepast in halfopen stallen.

Van de weergegeven methodes zijn alleen de CO₂-tracerratiomethode en het gebruik van meetwaaiers op de ventilatoren voldoende accurate methoden voor emissie monitoring.

Tabel 2.1 *Overzicht van methoden voor bepaling van het ventilatiedebiet in stalgebouwen.*

Methode	Toepasbaar in staltype	Orde-grootte onzekerheid (SD)	Bronnen van fouten	Referentie
Uitgestuurd ventilatorsignaal	Gesloten	20%	Effecten van luiken, vuil en slijtage (tot 50%)	Lin et al., 2018; Ni et al., 2017
Meetwaaiers op ventilator	Gesloten	<5%	Vuil en slijtage	Demmers et al., 1999
Hittedraad-anemometer	Gesloten	10%	Vuil en slijtage	Rosa et al., 2019
CO ₂ -tracerratiomethode	Gesloten	10%	CO ₂ bijdrage (drijf)mest, stro(oisel) of stropot	Mosquera et al., 2010; Rosa et al., 2019
Vochtbalans	Open en gesloten	5-40%	Latente warmte van dieren en mest	Blanes & Pedersen, 2005
Warmtebalans	Open en gesloten	30-100%	Sensibele warmte van dieren	Blanes & Pedersen, 2005
CO ₂ -tracerratiomethode	Open en gesloten	15-40%	Monsternamelocatie CO ₂ -productie dieren CO ₂ -bijdrage mest	Edouard et al., 2016
Anemometer	Open en gesloten	25%	Inlaat en uitlaat identificeren, stroomrichting van de lucht	Van Overbeke et al., 2016
Drukverschil	Open en gesloten	>50%		-

2.4 Mogelijkheden monitoren stalluchtconcentratie

2.4.1 *Algemene bedenkingen*

Om de emissie betrouwbaar te kunnen monitoren is het belangrijk dat een sensor accuraat en precies de concentratie in de uitgaande lucht (Figuur 2.1) kan meten. Bij langdurige continue metingen zal vooral de systematische meetfout van de sensor van belang zijn. De sensoren kunnen hiervoor niet uitsluitend in het laboratorium (met ijk-gassen uit cilinders) beoordeeld worden aangezien de stalomstandigheden de meetprestatie van de sensor kunnen beïnvloeden. Er kan in de stal sprake zijn van interferentie met andere gassen, sensorvergiftiging of gevoeligheid voor luchtvochtigheid en temperatuur. Deze invloeden kunnen leiden tot systematische fouten. Deels kunnen deze systematische fouten ondervangen worden met een eenmalige kalibratie van de sensor onder praktijkomstandigheden, maar een systematische fout kan ook veranderen gedurende de gebruikperiode en daarom zal het nodig zijn om de sensor periodiek te vervangen of met een zekere frequentie te blijven kalibreren. De duur tussen vervanging en kalibraties is afhankelijk van het type sensor dat wordt toegepast en de meetonzekerheid die geaccepteerd wordt. Wageningen Livestock Research heeft een ontwikkel- en validatieprotocol opgesteld om aan te kunnen tonen of sensoren voor ammoniak en methaan bruikbaar zijn in stallen (Vonk et al., 2021).

2.4.2 Ammoniak (NH_3)

In Nederland is het meeste onderzoek gedaan met de sensor Polytron 8100 van de firma Dräger. Deze sensor, ontwikkeld voor industriële toepassingen, is zowel in het lab als in de stal onderzocht (Melse et al., 2016; Mosquera et al., 2017). Uit deze onderzoeken blijkt dat deze sensor gelijkwaardig is aan de referentiemethode voor ammoniak bij concentraties boven de 1 ppm en toepasbaar is als indicatieve methode beneden de 1 ppm.

De Dräger Polytron C300, ook verkrijgbaar onder de naam DOL-53, is een sensor die is ontwikkeld voor de veehouderij in plaats van voor de industrie, maar vergelijkbare prestaties levert op basis van nauwkeurigheid in het laboratorium (Von Jasmund et al., 2022). Deze sensor is aanzienlijk goedkoper dan de Polytron 8100. Uit metingen in het Air Quality Lab van Wageningen Livestock Research blijkt dat de meetprestatie sterk afneemt bij concentraties onder de 1 ppm, waardoor deze sensor waarschijnlijk minder geschikt is voor toepassing in open stallen.

In het programma 'Integraal aanpakken' wordt in Nederland al enkele jaren in 18 melkveestallen en verschillende varkens-, melkgeiten en vleeskalverenstallen continu de ammoniakemissie gemeten. Daarbij worden er twee typen sensoren ingezet: de Dräger Polytron 8100 door WUR en de LSE analyzer door het Centrum voor Landbouw en Milieu (CLM) (Mosquera et al., 2021; Schep et al. 2022). De achtergrondconcentratie werd in de CLM methode semi-continu gemeten met de LSE analyzer en in de WLR methode periodiek met referentiemetingen. In varkensstallen (Mosquera et al. 2022), vleeskalverenstallen (Mosquera et al. 2022) en geitenstallen (Mosquera et al. 2022) zijn ook twee jaar lang continue metingen uitgevoerd met deze sensoren.

Er zijn internationaal geen projecten bekend van deze schaal. Wel zijn er diverse tests gedaan met low-cost sensoren die wellicht ook in staat zijn tot vergelijkbare meetprestaties. Het Vlaams Instituut voor Landbouw-, Visserij- en Voedingsonderzoek (ILVO) heeft verschillende ammoniaksensoren onderzocht onder stalomstandigheden en op basis daarvan besloten om met name de Axetris LGD F20A toe te passen bij onderzoek naar emissie monitoring (Zhuang et al., 2020).

In de bijlage is een, niet uitputtend, overzicht weergegeven van sensoren die op basis van de fabrieksspecificaties geschikt kunnen zijn voor emissie monitoring bij veehouderijbedrijven.

2.4.3 Geur

Er zijn nog geen sensoren geschikt bevonden om de geurconcentraties in de stal te monitoren. Maar ook de referentiemethode van olfactometrie (EN 13725) – een meetopstelling waarbij de menselijke neus van een panel van proefpersonen als meetinstrument wordt gebruikt - is in de afgelopen jaren onvoldoende betrouwbaar gebleken, o.a. vanwege de moeizame reproduceerbaarheid tussen geurlaboratoria (Melse & Nijeboer, 2018). De eerste stap in het ontwikkelen van een geursensor is het ontwikkelen van een accurate en reproduceerbare referentiemethode. Die referentiemethode is immers nodig om geursensoren aan te kunnen valideren. Op dit moment werken Aarhus Universiteit in Denemarken en Wageningen University & Research samen om een chemisch-analytisch alternatief te ontwikkelen voor olfactometrie (projectleider: Nico Ogink, WLR). Bij deze methode worden de dominante chemische verbindingen geïdentificeerd die samen een goede voorspeller zijn van de totale concentratie van geurcomponenten. Deze verbindingen worden in een luchtmonster gemeten d.m.v. gaschromatografie-massaspectrometrie (GC-MS). Als deze methode uitontwikkeld en inzetbaar is, kunnen ook geurmeetsystemen worden gevalideerd met daarin een set aan sensoren voor de meest belangrijke chemische verbindingen. Vanwege de complexiteit van het vertalen van een geurbeleving naar chemisch-analytische data is het onwaarschijnlijk dat er in de nabije toekomst geurmeetsystemen voor de veehouderij ontwikkeld zullen zijn.

2.4.4 Fijnstof (PM_{10} , $PM_{2,5}$)

Voor fijnstof zijn er veel sensoren beschikbaar op de markt. Echter, deze sensoren zijn vrijwel allemaal bedoeld om lage concentraties te meten in buitenlucht of in gebouwen. Fijnstofconcentraties in stalgebouwen zijn echter tot 300 maal hoger dan in de buitenlucht. Daarbij krijgen sensoren in stallen te maken met weerbarstige omstandigheden, zoals blootstelling aan gassen als ammoniak en koolstofdioxide, vervuiling

door (grof)stof, vocht en corrosie, bloedluis (rode vogelmijt), spinnen/spinnenrag, enzovoort. Op dit moment zijn er geen fijnstofsensoren bekend die in staat zijn gebleken om langere tijd fijnstof te meten in de weerbarstige omstandigheden van een stal.

Er zijn wel fijnstofsensoren die in de industrie worden toegepast en langdurig hoge stofconcentraties kunnen verdragen, maar deze zijn niet zondermeer toepasbaar in stallen. In de industrie wordt fijnstof gemeten in de schoorsteen of afgaskanaal bij een bekend ventilatiedebiet en doorgaans lage luchtvochtigheid. Doordat er in de veehouderij juist sprake is van een grote variatie in ventilatiedebieten en relatief hoge luchtvochtigheid zijn dezelfde methodes niet toepasbaar.

Fijnstofconcentraties worden daarom gemeten met methodes die ontwikkeld zijn voor het meten van fijnstof in de buitenlucht, soms binnenlucht. Er zijn diverse onderzoeken gedaan naar fijnstofmeetmethoden, maar deze bleken allemaal niet bestand tegen de stalomstandigheden voor langere tijd (Zhao et al., 2009; Winkel et al., 2015).

In het project Regio Deal Foodvalley werkt Wageningen Livestock Research samen met twee producenten van stofmeetmethoden om een meetmethode te ontwikkelen die tegen acceptabele kosten voor langere tijd fijnstofconcentraties kan monitoren in stallen met het oog op emissie monitoring. Resultaten daarvan worden verwacht in 2023-2024. Ook ILVO doet onderzoek waarin verschillende meetmethoden voor fijnstof onderzocht worden op geschiktheid voor toepassing onder de omstandigheden die zich voordoen in de stal. In een recent, nog niet gepubliceerd, onderzoek werden de DustTrak DRX, de Optyl MicroDust Pro CEL-712, de Grimm 1109 en de Grimm EDM 365 vergeleken met referentiemethodes.

2.4.5 Methaan (CH_4)

Voor methaan is er relatief weinig onderzoek uitgevoerd naar sensoren die de concentraties kunnen meten die in stallen voorkomen en beschikbaar zijn voor een prijs lager dan 5000 euro. Door WLR zijn in 2020 16 bedrijven benaderd die mogelijk een methaansensor konden leveren die voldeed aan de volgende eisen:

- een meetbereik tussen 0 en 100 ppm;
- een resolutie van 1 ppm;
- zo min mogelijk interferentie met andere koolwaterstoffen of een correctie daarvoor;
- nauwkeurig bij een luchtvochtigheid die kan variëren tussen 60 en 100%;
- een drift die beperkt is tot ppb-niveau per 24 uur;
- robuust in stalomgevingen met corroderende gassen zoals ammoniak en vervuilende stoffen zoals fijnstof;
- een levensduur van meerdere jaren;
- aanschafprijs beneden 5.000 euro;
- beschikbaar binnen 3-5 maanden.

Deze zoektocht leverde drie sensoren op. Deze zijn in het laboratorium getest conform het ontwikkel- en validatieprotocol (Vonk & Dinther, 2021). Sensoren die voldoen aan de benodigde specificaties met een prijs onder de 5.000 euro zijn, voor zover bekend, ontwikkeld door Siemens, Axetris en EMS. Van de drie bleek er één voldoende te scoren op de onderzochte aspecten. Deze sensor, de Axetris LGD F200A, wordt nu conform hetzelfde protocol in stallen beproefd. In het programma 'Integraal aanpakken' is er gemeten met de ABB Uras26 door WLR en de LSE analyzer door CLM. Beide methodes voldoen aan de selectiecriteria gesteld aan de sensor, maar zijn duurder dan 5.000 euro.

2.4.6 Koolstofdioxide (CO_2)

Het meten van de concentratie van koolstofdioxide is een belangrijk onderdeel in het berekenen van het ventilatiedebiet via de CO_2 -tracerratiomethode (Scholtens, Dore, Jones, Lee, & Phillips, 2004). Daarnaast is de concentratie van CO_2 , tezamen met luchttemperatuur en luchtvochtigheid, een belangrijk algemeen luchtkwaliteitskenmerk in relatie tot de gezondheid en het welzijn van de dieren en de arbeidsomstandigheden voor veehouders. Gezien het kort-cyclische karakter, wordt deze CO_2 niet betrokken bij de broeikasgasemissies.

Het is relatief eenvoudig om CO₂ te meten op de concentratieniveaus die zich voordoen in stallen, eenvoudiger dan het geval is voor ammoniak en methaan, omdat er reeds langere tijd goede CO₂-sensoren beschikbaar zijn. De uitdaging voor deze sensoren blijft wel dat ze langdurig bestand moeten zijn tegen weerbarstige stalomstandigheden (corrosie door ammoniak en vocht, vervuiling door stof en spinnenrag, insecten als spinnen en rode vogelmijt, enzovoort). WLR heeft veel ervaring met het meten van CO₂ concentraties met de sensor GMP252 van de firma Vaisala en in het verleden de SD-GAS-025 van Sensor Data (Mendes et al., 2015).

Voor emissie monitoring bestaan er voldoende geschikte CO₂-sensoren om de luchtkwaliteit te monitoren en ventilatiedebieten te berekenen met de CO₂-tracerratiomethode.

2.5 Mogelijkheden monitoren achtergrondconcentratie

Om de emissie te bepalen moet, naast het meten van de concentratie in de uitgaande lucht, ook de concentratie in de ingaande lucht (achtergrondconcentratie) worden gemeten (Figuur 2.1). Dit geldt voor de vervuilende stof in kwestie (ammoniak, fijnstof, enzovoort), maar ook voor CO₂ wanneer de CO₂-tracerratiomethode (Scholtens et al., 2004) wordt ingezet om het ventilatiedebiet te berekenen.

Bedacht moet worden dat achtergrondconcentraties doorgaans veel lager zijn dan de stalluchtconcentratie. Het kan dan nodig zijn verschillende sensoren met specifieke meetbereiken te gebruiken voor de ingaande en uitgaande lucht.

In het algemeen geldt: hoe groter het concentratieverschil tussen de ingaande lucht en de uitgaande lucht, hoe kleiner de relatieve onzekerheid van het emissiegetal. In (doorgaans mechanisch geventileerde) pluimvee- en varkensstallen zijn de concentratieverschillen voor ammoniak, fijnstof en CO₂ meestal groot. Bij (doorgaans natuurlijk geventileerde) melkveestallen zijn de concentratieverschillen klein.

Een praktische en goede optie voor situaties met grote concentratieverschillen is om concentraties van vervuilende stoffen en CO₂ in de ingaande lucht niet te meten maar schattingen in te lezen vanuit een externe bron, zoals het dichtstbijzijnde meetstation van het Landelijk Meetnet Luchtkwaliteit (voor dezelfde dag en hetzelfde uur). Voor de CO₂-balansmethode (feitelijk een ratiomethode) is het belangrijk m.b.t. de ingaande lucht dat ofwel alle stoffen in de ingaande lucht worden gemeten (ook wel 'nabije achtergrond' genoemd) ofwel dat voor alle stoffen een concentratie wordt ingelezen uit een externe bron (ook wel een 'verre achtergrond' genoemd). Om vast te stellen of lokale bronnen voor een structurele afwijking zorgen van de nabije achtergrond ten opzichte van de verre achtergrond, moet bij referentiemetingen zowel de nabije achtergrondconcentratie van CO₂ als de vervuilende stof vergeleken worden met de verre achtergrondconcentratie. In het project 'Fijnstofpilots' van Aeres/Praktijkcentrum Emissiereductie Veehouderij en Wageningen Livestock Research zijn 'verre achtergrondconcentraties' gebruikt uit het Landelijk Meetnet Luchtkwaliteit om emissies te berekenen van stallen met en zonder fijnstofreductietechniek. Vanuit dit project is een serie van meetrapporten verschenen (beschikbaar op <http://www.library.wur.nl>). In de discussies van deze rapporten is met gevoeligheidsanalyses telkens laten zien dat de fout die geïntroduceerd werd door het gebruiken van 'verre achtergronden' en een vaste waarde voor de achtergrond van CO₂ zeer klein was.

3 Protocollen en certificering

3.1 Veehouderij

Er zijn voor zover bekend nog geen protocollen of certificeringssystemen ontwikkeld specifiek voor emissie monitoring in stallen. Wel zijn er in opdracht van de rijksoverheid protocollen opgesteld om de gemiddelde emissie uit een huisvestingsstelsel, of gemiddelde emissiereductie van een emissiereducerende techniek, te bepalen voor ammoniak, geur, fijnstof, methaan en lachgas (Ogink et al., 2017; Ogink et al., 2010a; Ogink et al., 2010b; Groenestein et al., 2011; Mosquera et al., 2011). In internationaal verband zijn er protocollen opgesteld binnen het VERA initiatief (VERA, 2018). De VERA-protocollen zijn ontstaan uit een samenwerking tussen Deense, Duitse, Nederlandse en Vlaamse overheden en technische experts en sluit daarom op hoofdlijnen goed aan op voornoemde Nederlandse protocollen.

Veel van de basisprincipes en voorschriften uit voornoemde meetprotocollen zijn ook geldig en toepasbaar bij emissie monitoring. De eisen aan representatieve metingen voor de ruimtelijke spreiding in de stal zijn niet anders voor continue metingen. De voorschriften voor de temporele representativiteit in de protocollen zijn niet relevant voor continue metingen, maar kunnen wel van belang zijn om representatieve periodieke referentiemetingen uit te voeren.

Aangezien de beschikbaarheid van nauwkeurige en robuuste sensoren een belangrijke voorwaarde is voor emissie monitoring is er door WUR, TNO en RIVM een ontwikkel- en validatieprotocol opgesteld voor ammoniak- en methaansensoren in de veehouderij (Vonk et al., 2021). Met dit protocol kan aangetoond worden dat een sensor gelijkwaardig is aan de referentiemethode en dus toegepast kan worden voor emissie monitoring in de context van doelvoorschriften.

De bestaande protocollen voor periodieke metingen zijn ontwikkeld met het oog op wetenschappelijk onderzoek of metingen door meetbureaus om bijvoorbeeld emissiefactoren vast te stellen. De protocollen die in de toekomst nodig zullen zijn voor emissie monitoring in verband met vergunningsverlening of handhaving zullen meer lijken op protocollen en kwaliteitsstandaarden zoals die ontwikkeld zijn voor emissie monitoring in de industrie.

3.2 Industrie

In de industrie zijn er ook toepassingen van continue metingen om emissies te registreren. Continue metingen zijn bijvoorbeeld verplicht bij sommige IPPC-installaties (IPPC: Integrated Pollution Prevention and Control) als energiecentrales en afvalverbrandingsinstallaties die zijn opgenomen in de Richtlijn Industriële Emissies (Rie; 2010/75/EU). Activiteiten die zijn opgenomen in het Activiteitenbesluit milieubeheer (Am) als Type C inrichting, waar IPPC-installaties ook toe kunnen behoren, kunnen met periodieke metingen of berekeningen aantonen dat er voldaan wordt aan de emissiegrenswaarden.

3.2.1 *Andere industrieën*

Type C instellingen uit het Am moeten aantonen dat hun installatie voldoet aan de geldende emissiegrenswaarden. In het Am staan met name doelvoorschriften, die middels ministeriële regelingen verder uitgewerkt zijn naar concrete maatregelen. Voor een behoorlijk aantal activiteiten hoeft er niet gemeten te worden om aan te tonen dat de emissiegrenswaarden niet worden overschreden. Dan hoeft er alleen informatie over het proces of toegepaste maatregelen aangeleverd te worden om te onderbouwen dat de emissiegrenswaarde niet overschreden zal worden.

Controleverplichting

Een controleverplichting geldt voor activiteiten waarvoor de emissiegrenswaarden gelden. De vorm van de verplichte controle hangt af van de storingsemisatie. De storingsemisatie is de mogelijke toename bij het falen van een techniek of maatregel en de schadelijkheid van de mogelijke emissie. Aan de controleverplichting kan voldaan worden door periodieke of continue metingen van de emissie, maar ook door emissierelevante parameters te meten.

Meting van emissierelevante parameters (ERP's)

In artikel 2.8 van het Am staat dat er emissierelevante parameters (ERP's) gemeten mogen worden als vervanging van het meten van de concentratie van de stof waarvoor de emissiegrenswaarde geldt. Er zijn twee typen ERP's:

- categorie A ERP's: geven een kwantitatief beeld van de emissie;
- categorie B ERP's: geven een indruk van de werking van een techniek/proces.

Met behulp van afzonderlijke metingen kunnen bandbreedtes bepaald worden voor de ERP's. Het bevoegd gezag gebruikt de categorie B ERP's niet om te beoordelen of de emissie in orde is, maar om te beoordelen of de technieken en processen voldoen aan de vastgelegde eisen. Voorbeelden van categorie A ERP's zijn:

- totale concentratie bundeling van stoffen;
- concentratie andere stof;
- grondstofsamenstelling;
- brandstofsamenstelling;
- massabalans.

Voorbeelden van categorie B ERP's:

- temperatuur;
- debiet;
- drukval;
- bedrijfstijd;
- luchtvochtigheid;
- concentratie/pH in wasvloeiwater;
- niveaumeting;
- gewichtsmeting.

Eenmalige meting

De eenmalige metingen moeten uitgevoerd worden door geaccrediteerde meetinstanties en er moeten genormaliseerde meetmethodes worden gevolgd. In artikel 2.22 van de Am staat een overzicht van NEN-normen vermeld. Dit is NEN-EN 13284-1 en NEN-EN 13284-2 voor fijnstof en NEN-EN 2826 voor ammoniak. In NEN-EN 15259 staat vermeld op welke locatie de metingen moeten worden uitgevoerd, zodat de metingen representatief zijn voor de afgasstroom. Omdat de emissienormen afhankelijk zijn van luchtdruk, temperatuur en luchtvochtigheid moeten ook deze gemeten worden. Bij verbrandingsprocessen moet ook het zuurstofpercentage gemeten worden. Een afzonderlijke meting bestaat normaal gesproken uit drie metingen van een half uur. Het moet wel zo zijn dat deze metingen een representatief beeld geven van de werkelijke emissie, dus soms is een langere monster-/meetijd nodig of een grotere spreiding zoals beschreven in artikel 2.7 van het Am. Dit kan ook nodig zijn om een lage detectiegrens te bereiken.

3.2.2 IPPC-installaties en type C inrichtingen met controleregime 4

Voor IPPC-installaties, zoals afvalverbrandingsinstallaties en grote stookinstallaties gelden er meetverplichtingen volgens de Europese richtlijn voor IPPC-installaties. De meetinstallatie moet voldoen aan NEN-EN 15259 waarin voorschriften zijn opgenomen voor het meetoppervlak, de meetlocatie, doelen, meetplannen en rapportage. Er zijn voorschriften voor het meten van fijnstof, de gassen waterstofchloride, waterstoffluoride, zwaveldioxide, stikstofoxides, koolstofmonoxide en ook het debiet en diverse parameters als luchtdruk, luchtvochtigheid en temperatuur.

Het is volgens de IPPC-richtlijn niet toegestaan om emissies te berekenen en er zijn kwaliteitsborgingen opgesteld waar de emissiemetingen aan moeten voldoen:

- kalibratie van het operationele meetsysteem op basis van parallelle referentiemetingen;
- regelmatige controle op het functioneren van het meetsysteem op het bedrijf;

- jaarlijkse controle op de kalibratiefunctie op basis van parallelle referentiemetingen;
- parallelle referentiemetingen door geaccrediteerde meetinstanties die werken met behulp van gestandaardiseerde en gevalideerde meetmethoden.

Voor hoe de referentiemetingen uitgevoerd moeten worden zijn afzonderlijke NEN-normen opgesteld voor de verschillende emissies. Hoe het automatische meetsysteem moet worden beoordeeld is vastgelegd in NEN-EN 14181. In principe geeft NEN-EN 14181 volledige vrijheid in de keuze voor het meetprincipe omdat deze norm onafhankelijk van verschillende meetprincipes toegepast kan worden. De kwaliteitsborging die garandeert dat het meetsysteem voldoet aan de onzekerheidseisen wordt de QAL-procedure genoemd.

In de kwaliteitsborging voor automatische meetsystemen zoals gespecificeerd in NEN-EN 14181 worden vier stappen onderscheiden:

- QAL1, voorafgaand, bij het beoordelen van de toepasbaarheid van het systeem
- QAL2, de vijfjaarlijkse kalibratie van het systeem met een parallelle referentiemeting
- QAL3, de regelmatige controle van de gebruiker
- AST, de jaarlijkse controle van de kalibratiefunctie met behulp van parallelle referentiemetingen

In de Activiteitenregeling worden aan de parallelle referentiemetingen de volgende voorwaarden gesteld:

- de beheerder van de inrichting informeert het bevoegd gezag minimaal twee weken van te voren over datum en tijdstip van de meting (Activiteitenregeling, artikel 5.20, lid 2);
- de beheerder stelt het bevoegd gezag uiterlijk een dag van te voren op de hoogte als de meting geen doorgang vindt (Activiteitenregeling, artikel 5.20, lid 3);
- de parallelmeting duurt minimaal een half uur (Activiteitenregeling, artikel 5.20 lid 5);
- de parallelmeting omvat minimaal 15 metingen van tenminste een half uur verdeeld over drie dagen (NEN-EN 14181);
- de beheerder van de inrichting informeert het bevoegd gezag over de resultaten van de controle metingen (Activiteitenregeling, artikel 5.19, lid 2);
- de parallelmeting wordt uitgevoerd door een geaccrediteerde meetinstantie (Activiteitenregeling, artikel 5.20, lid 1).

Onzekerheid methoden

De maximaal toelaatbare onzekerheden van de meetmethodes zijn vastgelegd in artikel 2.23 van de Activiteitenregeling en deze worden in het voordeel van het bedrijf gerekend. Deze onzekerheden zijn uitgedrukt als 95%-betrouwbaarheidsinterval voor een individuele waarneming. Geaccrediteerde meetinstanties zullen dus onder deze waardes moeten blijven met hun meetmethode. In tabel 3.1 zijn de meetonzekerheden weergegeven die maximaal toegestaan zijn voor de meetmethodes.

Tabel 3.1 Maximale meetonzekerheid voor verschillende componenten uit artikel 2.23 van de Activiteitenregeling.

Component	Meetonzekerheid (95%-BI)
SO ₂	20
NO _x	20
Stof	30
totaal stof (stofklasse S)	30
Overige componenten	40
Debiet	20

Er zijn drie methodes om de meetonzekerheid van een individuele waarneming te bepalen:

De QAL2 procedure volgens NEN-EN 14181. Hierin wordt op basis van 15 parallelle metingen in 3 dagen een kalibratiecurve opgesteld en de meetonzekerheid bepaald. Deze methode leidt in principe tot een onderschatting van de onzekerheid aangezien niet alle onzekerheidsfactoren zich in de volledige bandbreedte voor zullen doen tijdens deze metingen.

- In de QAL1 procedure volgens NEN-EN 14181 worden alle onzekerheidsfactoren berekend, wat in praktijk ook een onderschatting van de meetonzekerheid oplevert (Poulleau et al., 2016).

-
- De procedure volgens NEN-EN 15267 waarin er vanuit wordt gegaan dat de gecombineerde onzekerheid van de monstername, kalibratie en de sensor gelijk zijn aan de maximaal toelaatbare onzekerheid. Deze methode is toegestaan als de meetonzekerheid in de sensor kleiner blijkt dan 75% van de toelaatbare meetonzekerheid. Deze methode bespaart op kosten van het uitvoeren van parallelle metingen.
 - Bij afvalverbrandingsinstallaties worden bij geen of geringe overschrijdingen van emissiegrenswaarden vuistregels toegepast van 66% onzekerheid korte termijn gemiddeldes en 26% onzekerheid in lange termijn gemiddeldes (Burgers, 2018).

Rapportage

Voor de rapportage van de continue metingen geldt dat voldaan moet worden aan NEN-EN 15259. Conform deze standaard bepaalt het bedrijf per bron voor elk opeenvolgend half uur de gemiddelde concentratie. Doordat er bij industriële toepassingen minder grote verschillen in debiet voorkomen wordt de concentratie van de afgasstroom gerapporteerd. Bij fluctuerend debiet wordt er een debietgewogen gemiddelde gerapporteerd. De rapportage met de meetresultaten en meetomstandigheden van de afgelopen 3 jaar wordt in combinatie met de kwaliteitsborging op het bedrijf bewaard.

3.2.3 Toepassing veehouderij

Er moet nog vastgesteld worden of de beproefde meetmethode en meetstrategie in het programma 'Integraal aanpakken' in verschillende typen stallen voldoet aan de meetonzekerheden zoals weergegeven in tabel 3.1. De verwachting is dat bij gesloten stallen hier wel aan voldaan wordt, maar bij open stallen is dit nog onzeker.

Verder moet onderzocht worden wat de minimale inspanning is die benodigd is om de meetprestatie van de sensor te waarborgen, evenals de hoeveelheid referentiemetingen die minimaal benodigd is en de mogelijkheid om met zero- en spanchecks de meetprestaties te waarborgen.

4 Toepassingsaspecten emissie monitoring

4.1 Drie doelniveaus voor inzet van sensortechnologie

Een belangrijke vraag is of sensortechnologie gebruikt kan worden voor een dubbeldoel: emissie monitoring voor het bevoegd gezag én het optimaliseren van de bedrijfsvoering door de veehouder. Door het ministerie van LNV zijn drie doelniveaus geïdentificeerd waarvoor sensoren zouden kunnen worden ingezet:

- a. voor het verbeteren van de bedrijfsvoering door de veehouder. Bij dit doelniveau is er geen sprake van dwingendheid maar van vrijwilligheid. Betrokken partijen kunnen zijn: de leverancier van het systeem van sensoren, dataplatform en dashboards (bijvoorbeeld een app), dierenarts, veevoeradviseur of stalklimaat specialist;
- b. om aan te tonen dat voldaan wordt aan eisen gesteld in certificeringsprogramma's en keurmerken, zoals IKB, Qlip, enzovoort. Naast de leverancier van het meetsysteem is degene die het certificeringsprogramma of keurmerk beheert, zoals een melkfabriek, een partij. Bij dit tweede doelniveau is er een mate van dwingendheid.
- c. voor emissie monitoring. Bij dit doelniveau zijn de metingen met sensoren onderdeel van een reguleringssysteem. Het heeft een juridische verankering, bijvoorbeeld in wetgeving en wordt gecontroleerd en gehandhaafd door bijvoorbeeld de omgevingsdienst.

4.2 Emissie monitoringstechniek versus managementtool

De emissies uit de stal zijn in principe geen relevante parameters in de bedrijfsvoering van de veehouder, maar de metingen die benodigd zijn om de emissie te bepalen kunnen wel bruikbaar zijn. Ammoniakemissies betekenen een verlies van stikstof uit de mest wat dit in theorie wel een relevante parameter maakt voor de mestaanwending. In praktijk zal de economische waarde van stikstof in de mest waarschijnlijk niet opwegen tegen de kosten om de ammoniakemissie te verminderen. De concentratiemetingen van ammoniak, koolstofdioxide en fijnstof kunnen wel van belang zijn voor de bedrijfsvoering en dan met name in de sectoren waar deze stoffen zich in concentraties voor kunnen doen die invloed hebben op de gezondheid en de technische resultaten van de dieren. Dit is bij varkens, leghennen, vleeskuikens, vleeskalveren en melkgeiten het geval. Wat betreft concentraties van methaan en geurcomponenten is er in geen enkele sector sprake van niveaus die relevant zijn voor het dierwelzijn. De CO₂-concentratie die gemeten wordt om het ventilatiedebiet te bepalen levert waardevolle informatie over het stalklimaat evenals secundaire metingen als temperatuur en luchtvochtigheid.

In de dagelijkse bedrijfsvoering zullen continue metingen van methaanconcentratie geen meerwaarde hebben. Inzicht in de methaanconcentratie kan wel waardevol zijn in de mestkelder onder de stal, aangezien een hoge methaanconcentratie voor explosiegevaar kan zorgen. Het meten van methaan kan ook als proxy dienen voor andere gassen die gevaarlijk zijn in de stal voor mens of dier, zoals waterstofsulfide. In de melkveehouderij is er doorgaans geen mogelijkheid om met de ventilatie te sturen op de concentratie van deze gassen, maar het kan wel dienen als waarschuwingssignaal als er een gevaar ontstaat. Om een waarschuwingssignaal te kunnen geven, zullen er wel absolute concentratieniveaus bepaald moeten worden.

In mechanisch geventileerde stallen heeft de veehouder in principe al inzicht in kwalitatieve informatie over het ventilatiedebiet, wat wil zeggen dat het duidelijk is of de ventilatoren snel of langzaam draaien. Kwantitatieve informatie over het werkelijke debiet uit de stal heeft voor de veehouder niet veel meerwaarde aangezien er geen directe relatie is tussen het ventilatiedebiet en dierwelzijn. Voor de metingen van de concentraties zijn kwantitatieve metingen wel een meerwaarde, zodat niet alleen vergelijkingen binnen de stal mogelijk zijn, maar ook vergelijkingen met andere stallen.

Een ander verschil tussen de metingen benodigd voor het stalklimaat en de emissie zijn de locatie van de metingen. Voor de emissie wordt gemeten in de uitgaande lucht zo dicht mogelijk bij de ventilatoren, terwijl het relevante stalklimaat zo dicht mogelijk bij de dieren moet worden gemeten. Met name in natuurlijk geventileerde stallen kan er een grote ruimtelijke spreiding van concentraties bestaan. In mechanisch geventileerde stallen zal de horizontale spreiding in concentraties kleiner zijn, maar kunnen er toch verschillen zijn in concentratie bovenin en onderin de stal. Of de concentratie bij de dieren hoger of lager is hangt af van de stalinrichting en het ventilatiesysteem. In het kader van doelvoorschriften is het wel noodzakelijk om inzicht te hebben in zowel het ventilatiedebiet als de gemeten concentraties, ook gedurende het jaar, zodat het mogelijk is om tijdig in te grijpen in de techniek en/of bedrijfsvoering.

4.3 Betrouwbaarheid sensoren voor emissie monitoring

De benodigde betrouwbaarheid van sensormetingen is afhankelijk van de toepassing. Als sensormetingen worden toegepast voor het vaststellen van absolute emissieniveaus ten behoeve van een specifieke stal- of bedrijfsemissie voor het al dan niet overschrijden van een emissieplafond is het wenselijk om absolute emissieniveaus accuraat vast te kunnen stellen. Dit betekent dat sensoren een kleine systematische fout mogen hebben. Een iets grotere toevalsfout echter, is niet noodzakelijkerwijs een probleem, omdat de willekeurige spreiding in meetresultaten die daardoor bestaat geneutraliseerd wordt door het berekenen van een gemiddelde uit een veelheid aan continue metingen in de tijd. Voor gesloten stallen is het beter mogelijk om de absolute emissie vast te stellen, omdat de onzekerheden voor het ventilatiedebiet veel kleiner zijn en de verschillen tussen de stal- en achtergrondconcentratie doorgaans veel groter. Voor halfopen en open stallen is er geen gouden standaard voor het bepalen van het ventilatiedebiet en is het door het kleinere verschil tussen de stal- en achtergrondconcentratie lastiger het verschil te meten.

De meest uitgebreide praktijkproef met sensormetingen in open stallen is uitgevoerd door WLR, CLM, Monteny Milieu Advies en Biont Research in een beleidsondersteunend onderzoeksproject genaamd Monitoring Melkvee als onderdeel van het programma 'Integraal aanpakken' (Mosquera et al. 2021, Schep et al., 2022). De bepaalde emissies worden vergeleken met een referentiemethode beschreven in meetprotocol ammoniak (Ogink, Mosquera, & Hol, 2017). De metingen van de afzonderlijke gasconcentraties voor ammoniak, methaan en koolstofdioxide, waarmee vervolgens de emissies berekend worden, kunnen ook vergeleken worden met referentiemetingen. Dit is in voornoemde project uitvoerig gedaan in 18 melkveestallen gedurende ruim 2 jaar. Een publicatie van deze data is in voorbereiding (Schep et al., 2022). Op hoofdlijnen laat de studie zien (zie tabel 4.1) dat de continue sensormetingen redelijk tot goed gecorreleerd zijn met de puntmetingen gebaseerd op referentiemethodes voor zowel ammoniak als methaan en geschikt voor het ondersteunen van bedrijfsmanagement.

Tabel 4.1. Stal- en achtergrondconcentraties van (CO₂, NH₃ en CH₄) zoals gemeten met de puntmetingen en continue metingen uitgesplitst in Meetopstelling 1 (WLR) en Meetopstelling 2 (CLM). Rechts het concentratieverschil tussen stal en achtergrond en het verschil tussen puntmetingen en continue metingen.

Meetopstelling	Gas	Stal [ppm]		Achtergrond [ppm]		Stal – Achtergrond [ppm]		
		Punt	Continu	Punt	Continu	Punt	Continu	Punt – Continu (%)
1	CO ₂	760	770	488	477	272	293	21 (7%)
1	NH ₃	2,31	2,36	0,19	0,19	2,12	2,17	0,05 (2%)
1	CH ₄	36,5	36,8	4,0	4,0	32,5	32,8	0,3 (1%)
2	CO ₂	738	730	507	463	231	267	36 (14%)
2	NH ₃	2,28	2,17	0,34	0,53	1,94	1,64	-0,3 (-17%)
2	CH ₄	35	33,3	6,2	5,3	28,8	28	-0,8 (-3%)

Voor het vaststellen van absolute emissieniveaus ten behoeve van een specifieke stal- of bedrijfsemissie voor het al dan niet overschrijden van een emissieplafond is een zorgvuldig kalibratieschema vereist om systematische meetfouten te vermijden. De meetopstellingen zoals gebruikt in Schep et al. (2022) voldeden dan ook nog niet volledig aan de criteria die zijn gesteld in het ontwikkel- en validatieprotocol voor sensoren

(Vonk et al., 2021). Dit betekent dat de afwijking tussen de continue metingen en de puntmeting groter waren dan de 5% zoals vastgelegd in dit protocol. In het protocol wordt wel benadrukt dat de uiteindelijke keus voor de te hanteren criteria en de daarmee samenhangende geaccepteerde meetonzekerheid een beleidsmatige keuze is.

In hetzelfde programma zijn ook stallen met varkens, melkgeiten, rosé vleeskalveren gedurende 2 jaar gemonitord door WLR. In alle diercategorieën bleek geen significant verschil tussen de gemiddelde bedrijfsemissies die bepaald zijn op basis van continue metingen en op basis van de referentiemetingen. (Mosquera et al., 2022)

Het groter of kleiner worden van een systematische fout na verloop van tijd (drift) is lastig te achterhalen en kan alleen ondervangen worden via regelmatig uitgevoerde puntmetingen. De frequentie van de puntmetingen van zes 24-uursmetingen is gebaseerd op het protocol voor het vaststellen van emissiefactoren. Het is niet uit te sluiten dat door middel van meerdere kortdurende puntmetingen op een dag in plaats van zes 24-uurs metingen in een jaar het wellicht mogelijk is om het verloop beter te achterhalen. Daarnaast zal dataverwerking een rol kunnen spelen in het detecteren van verloop in de sensoren door een acceptabele bandbreedte van waardes vast te stellen of realistische verhoudingen tussen bepaalde concentratieniveaus.

4.4 Kostenniveau van emissie monitoring

De kosten van het meetsysteem bestaan uit investeringskosten en exploitatiekosten. Dit laatste met name om de kwaliteit van het systeem te borgen. Daarnaast zal een meetsysteem een zeker elektriciteitsverbruik kennen.

4.4.1 *Investeringskosten*

De vorige schatting voor de kosten van de aanschaf van een integraal meetsysteem was 15.000 euro in open stallen en 5.000 euro in gesloten stallen (Ellen et al., 2018). Die kosten zijn vooralsnog niet sterk gedaald. De kosten van het meetsysteem worden niet alleen bepaald door de kosten van de sensor, maar ook door het ontwerp van het meetsysteem.

In gesloten stallen zijn er meerdere opties voor het bepalen van het ventilatiedebiet. Als er voor gekozen wordt om het ventilatiedebiet te bepalen met meetwaaiers in plaats van de CO₂-tracer-ratiomethode zijn er geen CO₂-sensoren nodig.

Als de achtergrondconcentratie continu wordt gemeten zijn er meerdere NH₃, CH₄ en CO₂-sensoren nodig. Er kan ook voor gekozen worden om de achtergrondconcentratie niet continu te meten, maar periodiek met referentiemetingen of af te leiden van het Landelijk Meetnet Luchtkwaliteit en/of andere bronnen. In dat geval zijn er ook minder sensoren nodig voor de achtergrondconcentratie.

In tabel 4.2 worden ter indicatie ruwe niveaus aangeven van de investeringskosten die benodigd zijn om in 2 verschillende typen stallen te meten met verschillende meetstrategieën.

Type 1 is een gangbare open melkveestal met een roostervloer en ligboxen waar natuurlijke ventilatie door de zijwanden en de nok het stalklimaat bepaalt. Hier worden de emissies van NH₃ en CH₄ volgens de tracergas-ratiomethode bepaald, met CO₂ als het door dier en mest geproduceerde tracergas. De CO₂-, NH₃- en CH₄-metingen worden gedaan in de lucht die de stal verlaat (in de stal) en in de binnenkomende lucht (buiten de stal) vinden ook CO₂-metingen plaats. Voor de metingen in de stal wordt op de meetlocatie in de lengte van de stal, ongeveer in het midden (zowel qua hoogte als stalbreedte) een monsternameleiding (polyethyleen (PE) of Teflon) met een aantal bemonsteringspunten geplaatst. Het aantal bemonsteringspunten in deze leiding is afhankelijk van de lengte van de stal, met als voorwaarde een maximale afstand tussen bemonsteringspunten van 10 meter. Alle bemonsteringspunten worden voorzien van kritische openingen en voorzien van een stoffilter om een constante en gecontroleerde monsternameflow door alle meetpunten mogelijk te maken. De monsternameleiding wordt aangesloten op een meetbuis waarin

de meetapparatuur voor continue concentratiemetingen is geplaatst. De stallucht wordt met behulp van een pomp uit de monsternaleiding aangezogen en door meetbuis getrokken. Alle sensoren worden verbonden met een datalogger.

Type 2 is een gangbare varkensstal met afdelingen waar de ventilatie mechanisch geregeld is. Hier wordt de emissie van NH₃ bepaald door het verschil in concentratie tussen de stallucht en de buitenlucht te vermenigvuldigen met het ventilatiedebiet. De stalluchtconcentratie wordt bij de ventilatiekoker in de afdelingen gemeten, de buitenluchtconcentraties op de plek waar de lucht de afdeling binnenkomt. Het ventilatiedebiet wordt bepaald op basis van de CO₂-ratiomethode. Ten behoeve van het bepalen van het ventilatiedebiet wordt bij een ventilator een CO₂-sensor geplaatst en één bij de inlaat van de buitenlucht. De NH₃-sensor wordt alleen bij de ventilator geplaatst. Alle sensoren worden verbonden met een datalogger.

Tabel 4.2 *Ruwe niveaus van investeringskosten voor een emissiemeetsysteem in open en gesloten stallen met beschreven meetstrategie.*

Component	Type 1	Type 2
Meetbuiscombinatie	2000	-
Ammoniaksensor	500-3000	500
Methaansensor	5000	-
CO ₂ -sensors	300-1500	200-1000
T en RV sensor	100-200	100-200
Datalogger	1000	1000

In tabel 4.2 wordt geen rekening gehouden met de kosten die gemoeid zijn met kalibraties van sensoren en periodieke controles en referentiemetingen en de levensduur.

4.4.2 *Vervanging meetcel*

Voor de elektrochemische sensoren die nu worden toegepast geldt dat de meetcel elke 2 jaar vervangen moet worden voor ongeveer één derde van de investeringskosten. Voor analyzers die op basis van optische methodes als spectrometrie meten geldt niet per definitie een beperkte levensduur, maar in praktijk zullen deze onder invloed van de stalomstandigheden ook na enkele jaren vervangen of hersteld moeten worden. Het is ook mogelijk dat er onverwachte schade ontstaat aan het meetsysteem door de activiteiten die plaats vinden in de stal.

4.4.3 *Referentiemetingen en controle*

De controle van de metingen zal zoveel mogelijk op basis van algoritmes plaats moeten vinden door verhoudingen tussen verschillende metingen te beoordelen. Toch zal er ook controle in de stal plaats moeten vinden om te inspecteren of de meetopstelling nog klopt. Wellicht zou dit gecombineerd kunnen worden met controles die nu al plaats vinden voor de borging van de productkwaliteit die zich steeds meer richt op borging van duurzaamheidseisen. De referentiemetingen kunnen de kosten van het meetsysteem erg op doen lopen door de arbeidskosten. De frequentie van deze referentiemetingen is afhankelijk van de meetstrategie die gevolgd wordt en de eisen die gesteld worden aan het meetsysteem. Wellicht is het ook mogelijk middels zero- en span-controles het functioneren van de sensoren te borgen zoals in industrie wordt toegepast.

4.5 Actoren en rollen bij emissie monitoring

In principe is het niet nodig dat de veehouder zelf werkzaamheden uitvoert aan het meetsysteem. Bij emissie monitoring kan dat zelfs ongewenst zijn omdat de meetgegevens dan gebruikt worden om de milieuprestaties van een veehouderijbedrijf te beoordelen in termen van zijn emissieplafond. In dat geval kan het een optie zijn om emissie monitoring als dienst af te nemen van een externe partij die zorg draagt voor installatie, onderhoud en kalibratie. Wel kan het in sommige situaties zo zijn dat de veehouder rekening moet houden met de sensoren of het meetsysteem.

De meetdata zullen voor de veehouder beschikbaar moeten zijn; bij voorkeur realtime, zodat de veehouder zelf de effecten kan analyseren van zijn bedrijfsvoering. Voor de overheid of handhaver is het misschien niet nodig om realtime inzicht te hebben in de meetdata. Dit kan wellicht betekenen dat de dataverwerking uitgevoerd moet worden met twee sporen of dat er flexibiliteit ingebouwd moet worden rond de terugkoppeling van resultaten. In alle gevallen zal al dan niet tijdelijke opslag van data echter nodig zijn.

De voeding voor het meetsysteem moet geleverd worden door de stroomvoorziening van het bedrijf. In geval van een stroomstoring of instabiele spanning kan dat effect hebben op het meetsysteem. In principe zal de capaciteit benodigd voor het meetsysteem verwaarloosbaar zijn en zullen stroomstoringen uiteraard ook niet wenselijk zijn vanuit het oogpunt van de bedrijfsvoering.

Wellicht moet er rekening gehouden worden met het meetsysteem bij het schoonmaken van de stallen. Met name in gesloten stallen voor pluimvee of varkens kan het schoonmaken van de stal met een hogedrukspuit een gevaar zijn voor de meetprestatie van de sensor als deze in de stal is opgehangen. Daarom is het wellicht verstandig als de veehouder de sensor weg kan halen tijdens schoonmaakactiviteiten en weer zelf terug kan hangen.

4.6 Handhaving

Er is nog geen borgingssystematiek ontwikkeld voor het controleren van metingen ter voorkoming van fraude en automatisch uitlezen, zodat de data gebruikt kunnen worden bij de verantwoording.

Er zijn verschillende aanwijzingen gegeven over de toepassing van handhaving bij emissie monitoring door de Taskforce Versnelling Innovatieproces Stalsystemen (2020):

- Er moet een éénduidig kader zijn waarin de handhavingseisen zijn uitgewerkt en vastgesteld. Inzichten daarover zullen in de loop van de tijd veranderen en met nieuwe inzichten gaan wijzigen. Daarom is het belangrijk dat éénduidig vastligt wat het bevoegd gezag behoort vast te stellen.
- Er moeten heldere eisen zijn, verankerd in wet- en regelgeving, waaraan sensor- en datasystemen moeten voldoen. Ook dienen de eisen te worden geformuleerd voor onafhankelijke accreditatie en voor het systeem van toezicht hierop.
- Er moet een systematiek zijn voor het afleggen van verantwoording door een individuele veehouder aan het bevoegd gezag. Voorgesteld wordt om een jaarlijkse geaccrediteerde rapportage ten aanzien van het niet overschrijden van het emissieplafond aan het bevoegd gezag aan te laten leveren, en bij overschrijding aan te geven in hoeverre deze is overschreden.

In de handhavingseisen zullen bijvoorbeeld duidelijke richtlijnen moeten staan voor toezichthoudend gezag wat de toegestane overschrijding mag zijn van emissiegrenswaardes binnen een bepaalde tijdsperiode. Hierin zal ook opgenomen moeten worden of handhavend gezag inzicht krijgt in individuele data of uitsluitend in de borging van de rapportage en de meetmethode.

5 Verder onderzoek en ontwikkeling

5.1 Meetmethode en -strategie

Er zijn nog verschillende uitdagingen voor de meetmethodes om deze toe te kunnen passen voor emissie-monitoring.

Voor fijnstof geldt dat er continue meetmethoden beschikbaar zijn, maar deze zijn nog niet geschikt voor emissie-monitoring. Voor geur zijn nog geen continue meetmethoden ontwikkeld of geschikt bevonden. Systemen voor emissie-monitoring van fijnstof zullen nog 3-5 jaren vergen, continue systemen voor geur vormen de grootste uitdaging: deze worden niet binnen 5 jaar verwacht.

Voor geur geldt dat er eerst fundamenteel onderzoek vereist is naar de relatie tussen geurconcentratie en geurcomponenten voordat het ontwikkelen van een meetsysteem mogelijk is (Ellen et al., 2018). Voor methaan geldt dat er sensoren zijn ontwikkeld onder de 5.000 euro die in het lab geschikt zijn bevonden om in de stal te meten, maar nog niet uitgebreid zijn onderzocht in de stal. Hier wordt op dit moment onderzoek naar gedaan.

Voor alle meetmethodes geldt dat de kosten en de betrouwbaarheid ook afhankelijk zijn van de meetstrategie. De minimale inspanning benodigd om de meetprestatie van de sensor te waarborgen moet beter worden onderzocht evenals de hoeveelheid referentiemetingen die minimaal benodigd is en de mogelijkheid om met zero- en spanchecks de meetprestaties te waarborgen.

Mogelijk kunnen de bevindingen over de relatie tussen methaanemissie en de productie van koolstofdioxide in de stal een rol spelen bij het bepalen van methaanemissies uit open stallen zonder het ventilatiedebiet te bepalen (Schep et al., 2022). Nieuwe kennis over deze relaties kunnen wellicht ook toegepast worden om met behulp van algoritmes de metingen te controleren.

De meetmethodes die besproken zijn in dit rapport zijn ontwikkeld voor gesloten, halfopen en open stallen. Voor gesloten stallen is het mogelijk om absolute emissieniveaus te bepalen op basis van continue metingen, maar voor open en halfopen stallen is het dat nog niet vastgesteld doordat de gemeten concentraties van sensor- en referentiemethoden net iets meer afwijken dan toegestaan in het ontwikkel- en validatieprotocol (Vonk et al., 2021). In het protocol wordt wel benadrukt dat de uiteindelijke keus voor de te hanteren criteria en de daarmee samenhangende geaccepteerde meetonzekerheid een beleidsmatige keuze is.

Door continue dataverwerking zou het wellicht mogelijk zijn onregelmatigheden in de data of trends snel op te sporen en te herstellen. Hiervoor zijn algoritmes nodig die op basis van bekende bandbreedtes van concentratieniveaus en verhoudingen signalen kunnen geven over verdachte situaties. Hier is verder onderzoek voor nodig, zodat de betrouwbaarheid van de continue metingen geborgd kan worden en verloop van sensoren of aanpassingen in het meetsysteem worden opgespoord.

De meetmethodes die besproken zijn in dit rapport zijn allemaal gericht op de emissie uit de stal. Voor halfopen en open stallen geldt dat de dieren ook naar buiten kunnen, hier zal ook rekening mee gehouden moeten worden om representatief de emissies te kunnen monitoren en wellicht een techniek of algoritme benodigd zijn om het aantal dieren in de stal te kunnen registreren of schatten.

Satellietwaarnemingen kunnen wellicht een aanvulling vormen op continue metingen van emissies uit de stal. Hier zal meer onderzoek naar gedaan moeten worden. Zowel naar de satellietwaarnemingen die nog niet nauwkeurig genoeg zijn als de toepassing van de satellietwaarnemingen.

5.2 Pilots, proeftuinen of fieldlabs

Er zijn verschillende pilots, proeftuinen of fieldlabs die zich richten op het continu meten van emissies uit stallen. Deze pilots hebben voornamelijk een technische insteek. De pilots richten zich op de meetprestatie van de sensoren, dataplatforms, dashboarding en de effecten van bedrijfsvoering op de emissie. Deze pilots van verschillende partijen met verschillende opzet en doelen zijn opgestart:

- 'Bedrijvenmeetnetwerk' in het project Regio Deal Foodvalley
- 'Maatwerk met Meetwerk' Liefstinghsbroek
- 'Netwerk Praktijkbedrijven' in het programma 'Integraal aanpakken'
- 'Praktijkevaluatie monitoringssysteem stallen'

en overige projecten/initiatieven meer gericht op het meten van stalluchtkwaliteit.

De metingen die onderdeel zijn van het programma 'Integraal aanpakken' worden uitgevoerd door WLR soms in samenwerking met CLM, Monteny Milieu Advies en/of Biont Research. Binnen dit programma zijn zoals genoemd enkele monitoringsprojecten afgerond waarin continue metingen beproefd werden. Er wordt nu binnen dit programma in het 'Netwerk Praktijkbedrijven' met behulp van deze methode en strategie een platform ontwikkeld voor het expertisecentrum stalmetingen waar de data verzameld kunnen worden en op verschillende niveaus inzichtelijk gemaakt.

Er zal in pilots ook nagedacht moeten worden over de inpassing in het vergunnings-, toezichts- en handhavingssysteem, omdat er verschillen zijn tussen de eisen aan een wetenschappelijk meetsysteem en de eisen aan een meetsysteem dat doelvoorschriften moet faciliteren. Er moet een borgingssystematiek worden ontwikkeld voor het controleren van metingen ter voorkoming van fraude en er moet automatisch worden uitgelezen, zodat de data gebruikt kunnen worden bij de verantwoording.

Literatuur

- Blanes, V., & Pedersen, S. (2005). Ventilation flow in pig houses measured and calculated by carbon dioxide, moisture and heat balance equations. *Biosystems Engineering*, 92(4), 483–493. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.09.002>.
- Burgers, W. (2018). Memo Meetonzekerheid bij continue metingen - Bepaling meetonzekerheid en correctie van gemiddelden. 13 p.
- Calvet, S., Gates, R. S., Zhang, G. Q., Estellés, F., Ogink, N. W. M., Pedersen, S., & Berckmans, D. (2013). Measuring gas emissions from livestock buildings: A review on uncertainty analysis and error sources. *Biosystems Engineering*, 116(3), 221–231. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.11.004>.
- Casey, K. D., Gates, R. S., Wheeler, E. F., Xin, H., Liang, Y., Pescatore, A. J., & Ford, M. J. (2008). On-farm ventilation fan performance evaluations and implications. *Journal of Applied Poultry Research*, 17(2), 283–295. <https://doi.org/10.3382/japr.2006-00055>.
- Demmers, T. G. M., Burgess, L. R., Short, J. L., Phillips, V. R., Clark, J. A., & Wathes, C. M. (1999). Ammonia emissions from two mechanically ventilated UK livestock buildings, *Atmospheric Environment*, 33, 217–227. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(98\)00150-2](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(98)00150-2).
- Edouard, N., Mosquera, J., van Dooren, H. J. C., Mendes, L. B., & Ogink, N. W. M. (2016). Comparison of CO₂- and SF₆- based tracer gas methods for the estimation of ventilation rates in a naturally ventilated dairy barn. *Biosystems Engineering*, 149, 11–23. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.06.001>.
- Ellen, H., Van Dinther, D., Melse, R., Mosquera, J., Ogink, N., Ploegaert, J., & Vonk, J. (2018). StalSens-Oren: meetsystemen voor bedrijfs-monitoring van emissies in de veehouderij Deskstudie naar de mogelijkheden voor directe emissieregistratie. Rapport 1099. Wageningen, the Netherlands: Wageningen Livestock Research. <https://doi.org/10.18174/448129>.
- H. Li, H. Xin, Y. Liang, R. S. Gates, E. F. Wheeler, & A. J. Heber. (2005). Comparison of direct vs. indirect ventilation rate determinations in layer barns using manure belts. *Transactions of the ASAE*, 48(1), 367–372. <https://doi.org/10.13031/2013.17950>.
- H. Xin, H. Li, R. T. Burns, R. S. Gates, D. G. Overhults, & J. W. Earnest. (2009). Use of CO₂ concentration difference or CO₂ balance to assess ventilation rate of broiler houses. *Transactions of the ASABE*, 52(4), 1353–1361. <https://doi.org/10.13031/2013.27787>.
- Huisman, I., & Bos, B. (2021). Buitenlandse voorbeelden van doelsturing in de landbouw. Report 1350. Wageningen, the Netherlands: Wageningen Livestock Research. <https://doi.org/10.18174/558666>.
- Janke, D., Willink, D., Ammon, C., Hempel, S., Schrade, S., Demeyer, P., ... Amon, T. (2020). Calculation of ventilation rates and ammonia emissions: Comparison of sampling strategies for a naturally ventilated dairy barn. *Biosystems Engineering*, 198, 15–30. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.07.011>.
- K. A. Janni, L. D. Jacobson, R. E. Nicolai, B. Hetchler, and V. J. J. (2006). Airflow reduction of large belt-driven exhaust ventilation fans with shutters and loose belts, *American society of Agricultural Engineers*, 49(July 2005), 217–226.
- Kort, M., Blanksma, N., Van Rijn, N., & Koning, R. (2020). Een nieuw systeem van stalbeoordeling. Hoe verbeteren we het proces voor beoordeling van emissies in stallen? Rotterdam, the Netherlands: Rebel Economics & Transactions bv.
- Lefcourt, A. M. (2002). Some potential problems for measuring ammonia emissions from farm structures. *Transactions of the ASAE*, 45(5), 1585–1591. <https://doi.org/10.13031/2013.11064>
- Liang, Y., Xin, H., Wheeler, E. F., Gates, R. S., Li, H., Zajaczkowski, J. S., ... Zajaczkowski, F. J. (2005). Ammonia emissions from U.S. laying hen houses in Iowa and Pennsylvania, *Transactions of the ASAE*, 48(5), 1927–1942. <https://doi.org/10.13031/2013.20002>.
- Lin, X., Zhang, R., Jiang, S., & Xin, H. (2018). Fan and ventilation rate monitoring of cage free layer houses in California, *Transactions of the ASABE*, 61(6), 1939–1950. <https://doi.org/10.13031/trans.12831>.
- Liu, Z., Powers, W., & Harmon, J. D. (2016). Estimating ventilation rates of animal houses through CO₂ balance. *Transactions of the ASABE*, 59(1), 321–328. <https://doi.org/10.13031/trans.59.10235>.

-
- Melse, R W, & Nijeboer, G. M. (2018). Evaluatie geurverwijdering door luchtwassystemen bij stallen. Oriënterend onderzoek naar werking gecombineerde luchtwassers en verschillen tussen geurlaboratoria. Rapport 1081. Wageningen, the Netherlands: Wageningen Livestock Research. <https://doi.org/10.18174/441648> o.
- Melse, R W, Ploegaert, J. P. M., & Ogink, N. W. M. (2016). Laboratory tests of Draeger Polytron 8000 with FL – 6813260 sensor for NH₃ measurement. Rapport 972. Wageningen, the Netherlands: Wageningen UR Livestock Research. <http://dx.doi.org/10.18174/388326>.
- Mendes, L. B., Edouard, N., Ogink, N. W. M., van Dooren, H. J. C., TinÔco, I. de F. F., & Mosquera, J. (2015). Spatial variability of mixing ratios of ammonia and tracer gases in a naturally ventilated dairy cow barn. *Biosystems Engineering*, 129, 360–369. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.11.011>.
- Monteny, G., Hartung, E. (Eds.) (2007). Ammonia emissions in agriculture. ISBN: 978-90-8686-029-6. <https://doi.org/10.3920/978-90-8686-611-3>. Wageningen, the Netherlands: Wageningen Academic Publishers.
- Morgan D. Hayes, Hongwei Xin, Hong Li, Timothy A. Shepherd, Yang Zhao, & John P. Stinn. (2013). Heat and moisture production of hy-line brown hens in aviary houses in the Midwestern U.S. *Transactions of the ASABE*, 56(2), 753–761. <https://doi.org/10.13031/2013.42663>.
- Mosquera, J., Hol, J. M. G., & Groenestein, C. M. (2010). Evaluatie van de CIGR methode voor de bepaling van het ventilatiegebied uit stallen. Rapport 429. Wageningen, the Netherlands: Wageningen UR Livestock Research. <https://edepot.wur.nl/179827>.
- Mosquera, J., Ploegaert, J. P. M., Nijeboer, G. M., Hol, J. M. G., & Melse, R. W. (2017). Onderzoek naar de nauwkeurigheid van een nieuw type sensor voor ammoniakconcentraties in stallucht. Rapport 1042. Wageningen, the Netherlands: Wageningen Livestock Research. <http://dx.doi.org/10.18174/420967>.
- Mosquera, J., van Dooren, H.J.C., van Well, J.A., Ogink, N.W.M., Monteny, G.J., (2021). Monitoring van methaan-, ammoniak- en lachgasemissies uit melkveestallen; Praktijkmetingen in de periode oktober 2018 - oktober 2020. Rapport 1286. Wageningen, the Netherlands: Wageningen Livestock Research. <https://doi.org/10.18174/536752>.
- Mosquera, J., van Dooren, H.J.C., Hol, J.M.G., Ploegaert, J.P.M., Ogink, N.W.M., (2022). Monitoring van methaan-, ammoniak-, en lachgasemissies uit stallen voor biggen, dragende zeugen en vleesvarkens; Praktijkmetingen in de periode oktober 2018 - oktober 2020. Rapport. Wageningen, the Netherlands: Wageningen Livestock Research. In afronding.
- Mosquera, J., van Dooren, H.J.C., Hol, J.M.G., Ploegaert, J.P.M., Ogink, N.W.M., (2022), Monitoring van methaan-, ammoniak-, en lachgasemissies uit stallen voor rosé vleeskalveren; Praktijkmetingen in de periode oktober 2018 - oktober 2020. Rapport. Wageningen, the Netherlands: Wageningen Livestock Research. In afronding.
- Mosquera, J., van Dooren, H.J.C., Hol, J.M.G., Ploegaert, J.P.M., Ogink, N.W.M., (2022) Monitoring van methaan-, ammoniak-, en lachgasemissies uit twee natuurlijk geventileerde geitenstallen; Praktijkmetingen in de periode oktober 2018 - oktober 2020. Rapport. Wageningen, the Netherlands: Wageningen Livestock Research. In afronding.
- Ni, J. Q., Liu, S., Lopes, I. M., Xie, Q., Zheng, P., & Diehl, C. A. (2017). Monitoring, modeling, and characterizing single-speed ventilation fans for an animal building. *Building and Environment*, 118, 225–233. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.03.036>.
- Ni, J. Q., Vinckier, C., Hendriks, J., & Coenegrachts, J. (1999). Production of carbon dioxide in a fattening pig house under field conditions. II. Release from the manure. *Atmospheric Environment*, 33(22), 3697–3703. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00128-4](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00128-4).
- Ning, X. (2008). Feeding, defecation and gaseous emission dynamics of W-36 laying hens. MSc thesis. USA: Iowa State University. <https://doi.org/10.31274/etd-180810-1494>.
- Ogink, N., Mosquera, J., & Hol, A. (2017). Protocol voor meting van ammoniakemissie uit huisvestingssystemen in de veehouderij 2013a. Rapport 1032. Wageningen, the Netherlands: Wageningen Livestock Research. <https://doi.org/10.18174/418425>.
- Ogink, N. W. M., Mosquera, J., & Hol, J. M. G. (2011). Protocol voor meting van fijnstofemissie uit huisvestingssystemen in de veehouderij 2010. Rapport 492. Lelystad, the Netherlands: Wageningen UR Livestock Research. <https://edepot.wur.nl/179499>.
- Pedersen, S., & Sällvik, K. (2002). Climatization of animal houses. Heat and moisture production at animal and house levels. I4th Report of Work Group on Climatization of animal houses. Report. Horsens, Denmark: Research Centre Bygholm, Danish Institute of Agricultural Sciences. Available online at: <https://www.cigr.org>.

-
- Pedersen, Soren. (2008). Carbon Dioxide Production in Animal Houses: A Literature Review. *E-Journal CIGR*, 10, 1–19. Available online at: <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/1205>.
- Poulleau, J., Fayolle, P., & Fiani, E. (2016). Robustness of the QAL2 calibration (EN14181). Uncertainty on the results given by a calibrated AMS. *International Conference and Exhibition on Emissions Monitoring (CEM 2009)*, Sep 2009, Stresa, Italy. Available online at: <https://hal-ineris.archives-ouvertes.fr/ineris-00973351/document>.
- Rosa, E., Arriaga, H., Calvet, S., & Merino, P. (2019). Assessing ventilation rate measurements in a mechanically ventilated laying hen facility. *Poultry Science*, 98(3), 1211–1221. <https://doi.org/10.3382/ps/pey524>.
- Samer, M., & Abuarab, M. E. (2014). Development of CO₂ balance for estimation of ventilation rate in naturally cross-ventilated dairy barns. *Transactions of the ASABE*, 57(4), 1255–1264. <https://doi.org/10.13031/trans.57.10572>.
- Schep, C.A., van Dooren, H.J.C., Mosquera, J., van Well, E.A.P., Keuskamp, J.A., Ogink, N.W.M., 2022. Monitoring van methaan-, ammoniak- en lachgasemissies uit melkveestallen; Praktijkmetingen in de periode oktober 2018 - oktober 2020. Rapport. Wageningen, the Netherlands: Wageningen Livestock Research. In afronding.
- Taskforce stalsystemen. (2020). Ruimte voor ondernemerschap en innovatie. Advies Taskforce Versnelling Innovatieproces Stalsystemen. Rapport. Online beschikbaar op: <https://open.overheid.nl>.
- Van Buggenhout, S., Van Brecht, A., Eren Özcan, S., Vranken, E., Van Malcot, W., & Berckmans, D. (2009). Influence of sampling positions on accuracy of tracer gas measurements in ventilated spaces. *Biosystems Engineering*, 104(2), 216–223. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.04.018>.
- Van Overbeke, P., De Vogeleer, G., Mendes, L. B., Brusselman, E., Demeyer, P., & Pieters, J. G. (2016). Methodology for airflow rate measurements in a naturally ventilated mock-up animal building with side and ridge vents. *Building and Environment*, 105, 153–163. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.05.036>.
- Vellinga, T., & Haan, M. De. (2022). Onderzoek naar de mogelijkheden van een Afrekenbare Stoffen Balans voor de melkveehouderij. Een analyse van datakwaliteit en handhaving. Rapport 1349. Wageningen, the Netherlands: Wageningen Livestock Research. <https://doi.org/10.18174/558537>.
- VERA. (2018). Test Protocol for Livestock Housing and Management Systems. Report. VERA – Verification of Environmental Technologies for Agricultural Production. Available online at: <https://www.vera-verification.eu>.
- Von Jasmund, N., Schmithausen, A. J., Krommweh, M. S., Trimborn, M., Boeker, P., & Büscher, W. (2022). Assessment of ammonia sensors and photoacoustic measurement systems using a gas calibration unit. *Computers and Electronics in Agriculture*, 194(October 2021), 106744. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106744>.
- Vonk, J., Van Dinther, D. Van. (2021). Ontwikkel- en validatieprotocol meetinstrumenten voor gasconcentraties in bedrijfsmonitoring van NH₃ en CH₄ uit veehouderijen; Toepassing bij sensorsystemen voor vaststellen van stalemissies. Rapport 1285. Wageningen, the Netherlands: Wageningen Livestock Research. <https://doi.org/10.18174/536495>.
- Wang, X., Ndegwa, P. M., Joo, H. S., Neerackal, G. M., Stöckle, C. O., Liu, H., & Harrison, J. H. (2016). Indirect method versus direct method for measuring ventilation rates in naturally ventilated dairy houses. *Biosystems Engineering*, 144, 13–25. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.01.010>.
- Williams, R., Kilaru, V. J., Snyder, E. G., Kaufman, A., Dye, T., Rutter, A., Russel, A., Hafner, H. (2014). *Air Sensor Guidebook*. United States Environmental Protection Agency (US-EPA). Available online at: <https://www.epa.gov>.
- Winkel, A., Llorens Rubio, J., Huis in't Veld, J. W. H., Vonk, J., & Ogink, N. W. M. (2015). Equivalence testing of filter-based, beta-attenuation, TEOM, and light-scattering devices for measurement of PM₁₀ concentration in animal houses. *Journal of Aerosol Science*, 80, 11–26. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2014.10.009>.
- Zhang, G., Strøm, J. S., Li, B., Rom, H. B., Morsing, S., Dahl, P., & Wang, C. (2005). Emission of ammonia and other contaminant gases from naturally ventilated dairy cattle buildings. *Biosystems Engineering*, 92(3), 355–364. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.08.002>.
- Zhang, Y. (2004). *Indoor Air Quality Engineering*. CRC Press. ISBN 9781566706742.
- Zhuang, S., Brusselman, E., Sonck, B., & Demeyer, P. (2020). Validation of five gas analysers for application in ammonia emission measurements at livestock houses according to the VERA test protocol. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(15). <https://doi.org/10.3390/app10155034>.

Bijlage 1 Overzicht ammoniaksensoren

Merk	Model	Meetprincipe	Continu	Eigenschappen volgens producent						Sample omstandigheden				
				Kosten (euro)	Bereik	Detectielimiet	Nauwkeurigheid	Herhaalbaarheid	Reactietijd (T90)	Meetinterval	Gevoeligheid	Temperatuur	Luchtvochtigheid	Debiet
	Gaswasfles	Natchemisch	Nee											
	NO _x -monitor + NH ₃ converter	Chemoluminescentie	Nee											
Innova	1314	Fotoakoetisch	Ja		0-44 ppmv			1%		<150s		Detectielimiet verandert bij temp/luchtdruk corrigeert in analyse		30cm3/s
Picarro	G2103	Cavity Ring-down spectroscopy	Ja	~100000	0.003 ppb-50 ppmv		<0,1%			2 m	1 s		< 85 %	1.5 slm
Gasera	One	Photoacoustic infrared spectroscopy	Ja		ppb range - 100000 x ppb range		<1% op kalibratieniveau	<1% op kalibratieniveau		40 s - few minutes		Niet gevoelig voor temperatuur of luchtdrukwisselingen	< 90 %, niet neerslaan	1 l/min
Gasmet	CX4000	Fourier Transform Infrared spectroscopy	Ja		0-150ppmv					<120s		temp, rh		120-600l/h
Axetris	LGD F20-A	Tunable Diode Laser spectroscopy	Ja	~4000	0-69 ppmv		2%			2s	1s	depends	depends	3 l/min
Rosemount	CT5100	Quantum Cascade Laser Gas Analyser	Ja		0-52 ppmv			1%					10-95 %	
Honeywell	EC-FX-NH3	Elektrochemisch	Ja	~1500	0-100	?	5 % full scale	10% full scale		30 s			5-100%	
Dräger	Polytron 8000 FL-6813260	Elektrochemisch	Ja	2300	1-100		1.5 ppm of 5 %						15-95%	
Dräger	DOL-53 (Polytron C300)	Elektrochemisch	Ja	700	0-100	?	1.5 ppm of 10 %			30 s (T50)		On request	15 - 95 %	
LSE	NH3-1700	Fotoakoetisch	Ja		0-15 ppm		0.025 or 2 %			15 s	2s			80-140 l/min
Chillgard	RT/5000	Fotoakoetisch infrared spectroscopie			0-1000 ppm	10 ppm	1 ppm or 10%			<70s			0-95%	
Figaro	TGS 2444	Metaaloxide semiconductor	Ja	~100	10-300 ppm								without condensation	
EMS	Macview	Solid state Paired Emitter Detector (Photo) Diode	Ja		0-30/0-50 ppmv	0,01 ppmv	0,02% full scale or 0,09ppmv			15 min			0-99	
CTI	SD1-NH3	Elektrochemisch	Ja	1500	0/100 ppm		~5%	3% of full scale					5-100	
ABB			Ja											
ETG risorse	6900 NH3	Tunable Diode Laser spectroscopy	Ja		0-15 / 0-50 ppm	0,1 ppm	2% full scale			2 s		depends	min 10 -65C	5000ml/min
Horiba														

Graywolf	DirectSense	Elektrochemisch	Ja		0-100 ppm	<1 ppm			m in 25 - 70C	0-98%
CEMsolutions										
Envea										
Sensortech	SGX-7NH3-1000			90	0-100 ppm	1 ppm		10%	<90s	min40-50C 15-90%
Membrapor	NH3 CR-50	Elektrochemisch		307	0-50	0.5			50	H2S
Euro Gas	NH3-100	Elektrochemisch		500	0.5-100	0.5			90	H2S
Sensoric	NH3 3E 100 SE Citytech	Elektrochemisch		477 euro (sensor+transmitter)	0-100	<1			60	H2S
Envea	Cairpol A40-0060	Elektrochemisch		800 for three complete sensors	0.5-25	0.001	30% unc		90	H2S
Aeroqual	Ammonia Sensor Head	Elektrochemisch		1023 incl btw (Fixed Monitor, sensor head en converter + power supply)	0.2-100	0.1	acc = 0.5		120	?
Nenvitech	NT-NH3-PL100	Elektrochemisch			0-100	1			60	No significant cross-sensitivity, some neg. values
Alphasense	NH3-B1	Elektrochemisch		245 (sensor+transmitterboard+fixing kit+USB-link)	to 100	<0.3			150	Unclear
Winsen	ZE03-NH3	Elektrochemisch		53 euro, maar niet volledig gekalibreerd /de ZE03-NH3 (57 eur) wel.	0-50 / 0-100	0.1 / 1			90 / 150	H2S
Vaporsense										
Optic sensor Aarhus										
Fluorescence sensor Aarhus										

Bijlage 2 Overzicht fijnstofsensoren

Merk	Soort	Meetprincipe	Eigenschappen volgens producent							Sample omstandigheden						
			Continu	Kosten (euro)	Bereik ug/m3	Detectielimiet	Minimum grootte deeltje um	Nauwkeurigheid	Herhaalbaarheid	Reactietijd (T90)	Meetinterval	Gevoeligheid	Parameters	Temperatuur	Luchtvochtigheid	Debiet
	Impactor	Gravimetrisch	Nee													
	Cycloon	Gravimetrisch	Nee													
TSI	Dusttrak DRX 8533	90° light scattering	~Ja		1-150000		0,1-15 um	1% or 1ug/m3			1-60s		PM 1,2.5,10	min20-60C	0-95%	3l/min
Thermofischer	TEOM 1405	Microbalance	~Ja		0-1000000		0.1	2 ug/m3	0.75%		2s			min40-60C		3l/min
Grimm	Pas 1.109	90° light scattering and filter-sampling	~Ja		0,1-100.000		0,3-20		5%		1a6s		15 kanalen	0-40	<95%	1,2 l/min
Thermofischer	FH 62 I-R	Beta attenuation	~Ja		0-5000		2		29-149							
Fidas	200		Ja													
Sintrol	DumoPro	Inductive electrification	Ja		0-'several' g/m3		0.01				1s-600s			min40-60C	<95%	
Ametek			Ja													
Durag			Ja													
Sigrist			Ja													
Sick	FWE 200	Scattered light forward	Ja		0-5000				2%					min20-50		
Envea	PCEM 181 Stack WS	Scattered light forward	Ja		0-500000		<0,3							<100C		
Novafitness	SDS021	Scatter		80	0-20000		1-100									

Nova	SDS011	Scatter	Ja	25	0-999	0.3	~15% or 10 ug/m3	1s	Pm 2,5 pm10	min10-50 C	<70%	
Sensirion	SPS30	Scatter	Ja	38	0-1000	0.3	~10 to 25	1s	PM1,2,5,4,10			
Plantower	PMSx003	Scatter	Ja	15	0-500	0.3	10%					
Shinyei	PPD 42NJ	Scatter		15	0-28n/cm3							
Shinyei	PPD60V	Scatter		250	0-70n/cm3							
Alphasense	Optical Particle Monitor OPC- N3	Scatter		400	0,1-1500000	0,35-40		1-30 s		min-50C	0-95%	5,5 l/min
Sharp	GP2Y1010AU0F	Scatter		17	0-600					min10-65C		

Bijlage 3 Overzicht methaansensoren

Merk	Model	Meetprincipe	Continu	Eigenschappen volgens producent					Sample omstandigheden						
				Kosten (euro)	Bereik	Detectielimiet	Nauwkeurigheid	Herhaalbaarheid	Reactietijd (T90)	Meetinterval	Gevoeligheid	Temperatuur	Luchtvochtigheid	Debiet	
ABB	EL3000	URAS26 infrarood photometer	Ja	>5.000	0-100 ppm	<0.4 % span		<0.5% span		5 s			<2% per 10C		20-100 l/h
LSE	NH3-1700	Fotoakoestisch	Ja	>5.000	0-15 ppm		0.025 or 2 %			15 s	2s				80-140 l/min
Siemens	ULTRAMAT 23	Near-IR	Ja	<5.000		1 %	< 2%	< 1%		Depends		Temp, Pressure	0-50 C		72-120 l/h
Axetris	LGD F200P2-A	Tunable diode Laser spectrometry	Ja	<5.000	0-100 ppm		2%			2s		Depends			3 l/min

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

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.

