



Validatie van de Dräger Polytron® A500 (DOL 51) sensor voor het meten van luchtconcentraties van ammoniak: lab- en veldtests bij luchtwassers op vier varkensstallen

Jan Vonk, Joost Wagenveld-van Veen, Sabine Schnabel, Tom Rijkers, Sara Bahrami en Albert Winkel

Rapport 1605



WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH

Validatie van de Dräger Polytron® A500 (DOL 51) sensor voor het meten van luchtconcentraties van ammoniak: lab- en veldtests bij luchtwassers op vier varkensstallen

Jan Vonk¹, Joost Wagenveld-van Veen¹, Sabine Schnabel², Tom Rikkers¹, Sara Bahrami² en Albert Winkel¹

¹ Wageningen Livestock Research

² Biometris, Wageningen University & Research

Dit onderzoek is uitgevoerd door Wageningen Livestock Research en gesubsidieerd door het ministerie van Landbouw, Visserij, Voedselzekerheid en Natuur, in het kader van het Beleidsondersteunend onderzoek thema 'LVVN-coördinator emissie monitoring' (projectnummer BO-43.20-101-022) en de provincie Noord-Brabant.

Wageningen Livestock Research
Wageningen, december 2025

Rapport 1605

Vonk, J., J. Wagensveld-van Veen, S. Schnabel, T. Rikkers, S. Bahrami, A. Winkel, 2025. *Validatie van de Dräger Polytron® A500 (DOL 51) sensor voor het meten van luchtconcentraties van ammoniak: lab- en veldtests bij luchtwassers op vier varkensstallen*. Wageningen Livestock Research, Rapport 1605.

Synopsis

Voor het vaststellen van emissiefactoren en de afgifte van doelvoorschriftvergunningen in de veehouderij is het vereist dat emissies uit stallen correct gemonitord kunnen worden, bijvoorbeeld via sensormetingen. Valideren van de te gebruiken sensoren onder praktijkomstandigheden is de eerste stap in de kwaliteitsborging van de metingen. In dit rapport wordt de validatie van de Dräger Polytron® A500 (met FL-sensorelement)/DOL 51 voor meting van de ammoniakconcentratie voor en achter de luchtwasser in varkenshouderijen beschreven. De sensor is voorwaardelijk geschikt bevonden, wat wil zeggen dat resultaten voldoen na toepassing van een correctie op basis van een veldkalibratie tegen de standaard referentiemethode.

Abstract

To determine emission factors and the issuing of target-oriented permits in livestock farming it is required that emissions from barns can be monitored correctly, for instance using sensor measurements. Validation of the sensors to be used under practical circumstances is the first step in the quality assurance of the measurements. This report describes the validation of the Dräger Polytron® A500 (with FL sensor element)/DOL 51 for the measurement of ammonia concentration upstream and downstream of air scrubbers in pig farms. The sensor is found to be conditionally suitable, meaning that results suffice when applying a correction based on comparison under practice conditions against the standard reference method.

Dit rapport is gratis te downloaden op <https://doi.org/10.18174/704780> 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, 2025

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.

Wageningen Livestock Research Rapport 1605

Inhoud

Woord vooraf	5
Samenvatting	7
1 Inleiding	10
1.1 Aanleiding	10
1.2 Context	10
1.3 Validatie van gassensoren	11
1.4 Doel van deze studie	11
2 Beschrijving onderzochte sensor: Dräger Polytron® A500/DOL 51	12
3 Werkwijzen en resultaten labtests voorafgaand aan de veldmetingen	15
3.1 Responstijd	16
3.2 Kalibratie: kalibratiefuncties en onzekerheid	16
3.3 Herhaalbaarheid	17
3.4 Instrumentherhaalbaarheid	17
3.5 Detectielimiet	18
3.6 Uitgebreide meetonzekerheid	18
4 Werkwijze en resultaten veldtests	19
4.1 Verloop veldmetingen, databeschikbaarheid en outliers	19
4.2 Veldkalibratie	21
4.3 Instrumentherhaalbaarheid na afloop veldmetingen	21
5 Werkwijzen en resultaten labtests na afloop van de veldmetingen	23
6 Discussie	25
6.1 Dräger Polytron® A500/DOL 51 en Dräger Polytron® C300/DOL 53	25
6.2 Labtests ingangscontrolle (voorafgaand aan inzet in het veld)	25
6.3 Veldtests op de vier varkensbedrijven	25
6.4 Generieke of sensor-specifieke correctie	26
6.5 Labtests uitgangscontrolle (na afloop van inzet in het veld)	26
7 Conclusies en aanbevelingen	27
Bronnenlijst	28

Woord vooraf

Voor de vaststelling van emissiefactoren en binnen een stelsel van vergunningverlening op basis van emissieplafonds en emissiemonitoring is kwaliteitsborging van de gebruikte sensoren cruciaal. De eerste stap in die kwaliteitsborging bestaat eruit een merk en model sensor onder specifieke omstandigheden te valideren middels lab- en veldtests; oftewel het leveren van een proof of concept voor die sensor en het toepassingsgebied. Dit kon voor de Dräger Polytron® A500 met FL-sensorelement (ook bekend als de DOL 51) en het toepassingsgebied van de varkenshouderij worden gedaan door gebruik te maken van gegevens uit het project 'Goed benutten biologische combi-luchtwassers' (Groot Wassink et al., 2025). We bedanken de provincie Noord-Brabant als opdrachtgever en de varkenshouders die deelnamen in het project voor het faciliteren van deze validatie. Het conceptrapport is door een ter zake deskundige interne en externe reviewer, die beide niet bij de uitvoering van het project betrokken waren, beoordeeld. Wij danken hen voor de opbouwende commentaren die in de voorliggende rapportage verwerkt zijn.

Wageningen, december 2025,

De auteurs

Samenvatting

Voor het vaststellen van emissiefactoren en de afgifte van doelvoorschriftvergunningen in de veehouderij is het vereist dat emissies uit stallen correct gemonitord kunnen worden, bijvoorbeeld via sensormetingen. Het continu kunnen meten van emissies biedt veehouders niet alleen meer handelingsperspectief, maar opent ook mogelijkheden om te belonen op behaalde milieuprestaties, of vergunningsverlening hierop te gaan baseren. In dat geval wordt een emissieplafond gesteld en aan de hand van continue (sensor-)metingen vastgesteld dat deze niet overschreden wordt. Daarbij is de veehoud(st)er vrij in de keuze met welke stal- en managementmaatregelen het doel te behalen. Evenwel vraagt dit wel om goede borging van de kwaliteit van de metingen, te beginnen met het aantonen van de geschiktheid van een sensor om binnen zekere omstandigheden tot correcte resultaten te komen. In dit rapport wordt het 'proof of concept' geleverd voor de Dräger Polytron® A500 met FL-sensorelement/DOL 51, in dit geval bedoeld om ammoniakconcentraties voor en na luchtwassers bij varkens te meten.

Benodigde data voor dit onderzoek kwam voort uit het project 'Goed benutten biologische combi-luchtwassers', uitgevoerd door WLR in opdracht van de provincie Noord-Brabant. Aanvullende data-analyse en deze rapportage werden uitgevoerd in het kader van het 'Landelijk coördinatorschap emissie-monitoring' in opdracht van het ministerie van LNV. Aan het uitvoeren van de validatie ligt het gestelde in deel D van de 'Richtlijnen voor het bepalen van emissies uit veestallen (versie 2)' ten grondslag. Hierin worden (optionele) labtests en verplichte veldtests beschreven, bedoeld om prestaties van sensoren beoogd voor continue emissie-monitoring te beoordelen.

De in totaal acht sensoren werden voor plaatsing in het veld onderworpen aan de bij WLR gebruikelijke labkalibratie. Hieruit volgen al de belangrijkste prestatiekenmerken, namelijk responstijd, kalibratie, herhaalbaarheid en detectielimiet. Bij de analyse van de data werd op basis van hiervoor beschikbare gegevens tevens de instrumentherhaalbaarheid bepaald. Met uitzondering van herhaalbaarheid in de uitgaande luchtstroom van de wasser, voldeden de sensoren aan de door de Richtlijnen gestelde criteria. Ten tijde van het (oorspronkelijk) opstellen van de validatieprocedure was meten achter de luchtwasser en dus bij lage concentraties met sensoren feitelijk nog niet mogelijk. Het toepassen van een procentuele eis zonder absoluut minimum leidt hier tot problemen.

Toepassing van de sensoren in het veld begon met een opstartfase waarin praktische zaken zoals datalogging door de wassers geregeld werd. Evenwel leverde dit tijdens het daaropvolgende jaar waarin referentiemetingen werden uitgevoerd, op twee van de vier locaties regelmatig data-uitval op. Hierdoor is voor beschouwing van in- en uitgaande lucht apart minder data beschikbaar dan gewenst, die bovendien betrekking heeft op drie in plaats van vier locaties. Naast ruwe data (feitelijk de fabriekskalibratie) werden een lab- en veldkalibratie toegepast. Bij de laatste werd dit zowel generiek op basis van alle beschikbare dataparen als per sensor met daarop betrekking hebbende waarnemingen gedaan.

Om aan de vereisten te voldoen bleek veldkalibratie noodzakelijk. Daarbij is helling en afsnijpunt bij een generieke kalibratie acceptabel, maar is correlatiecoëfficiënt voor de uitgaande lucht te laag. Bij een locatie- c.q. apparaat-specifieke veldkalibratie wordt aan vereiste prestatiekenmerken voldaan, met wederom uitzondering van instrumentherhaalbaarheid bij de uitgaande lucht (en daardoor tevens de combinatie van in- en uitgaande lucht). Naast het hiervoor gestelde criterium bleken deze aan het einde van de levensduur gekomen te zijn, wat werd bevestigd door de uitgangscntrole in het lab.

Geconcludeerd wordt dat de Dräger Polytron® A500 met FL-sensorelement/DOL 51 geschikt is voor continue (emissie-)monitoring van luchtwassers bij varkens op voorwaarde dat er gecorrigeerd wordt met een correctiefunctie gebaseerd op referentiemetingen uitgevoerd voor dit sensortype. Dit betekent tevens dat de sensor ingezet kan worden voor meting van lucht die het dierverblijf verlaat (directe emissiemeting), ook voor lage concentraties bijvoorbeeld bij jonge dieren of toepassing van bronmaatregelen. Hierbij dienen dan

wel de benodigde referentie- (vaststelling van emissiefactor) of controlemetingen (bij emissiemonitoring) te worden verricht. Advies is tevens om de sensor achter de wasser jaarlijks preventief te vervangen.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Sensoren voor het meten van luchtconcentraties van gassen in de veehouderij zijn de afgelopen vijf tot tien jaar snel betrouwbaarder en betaalbaarder geworden. Met deze gassensoren wordt het mogelijk om concentraties en emissies van gassen in de veehouderij continu te monitoren. De verkregen informatie kan door de veehouder worden gebruikt om zijn bedrijfsopzet en -management met betrekking tot emissies te evalueren, en waar nodig bij te sturen. Naast een toegenomen handelingsperspectief voor de veehouder zelf kan de data ook worden benut in een stelsel van prestatiegerichte doelsturing. Hierbij wordt door sectororganisaties of afnemers een (extra) beloning gegeven voor het behalen van doelen. Een derde mogelijkheid is om de sensormetingen te gebruiken als basis voor vergunningverlening. In een zogenaamde doelvoorschriftvergunning wordt een emissieplafond opgenomen en wordt met sensoren gemonitord dat deze hoeveelheid emissie onderschreden blijft.

1.2 Context

Om doelvoorschriftvergunningen op basis van emissie monitoring met sensoren te realiseren heeft het ministerie van Landbouw, Visserij, Voedselzekerheid en Natuur (LVVN) onder het Regieorgaan 'Versnellen innovatie emissiereductie duurzame veehouderij' de 'Taakgroep sensor- en datasystemen' ingesteld. Onder de Taakgroep ressorteren drie landelijke coördinatoren die respectievelijk de technische, datagebruik/-uitwisseling en juridische aspecten van deze vergunningen uitwerken. Voor het technische aspect wordt deze rol ingevuld door een team van Wageningen Livestock Research (WLR) onder leiding van dr.ir. Albert Winkel. De drie landelijke coördinatoren zijn aangekondigd in een Tweede Kamer brief van minister Adema van 25 november 2022 ¹. Het Regieorgaan is van start gegaan na ondertekening van een convenant op 4 december 2023 ². De voortgang van deze aanpak gericht op doelvoorschriftvergunningen, emissieplafonds en emissie monitoring is gegeven in een Tweede Kamer-brief van ministers Adema en Van der Wal van 23 januari 2024 ³.

De rol van 'landelijk coördinator emissie monitoring' moet voorzien in wetenschappelijke of technische componenten voor emissie monitoring die overkoepelend of overstijgend zijn aan individuele projecten (fieldlabs, praktijkpilots, proeftuinen, enzovoort), provincies of gemeenten (beleid, subsidieregelingen, vergunningen, enzovoort). Het gaat onder andere om:

- het produceren van een landelijke richtlijn (thans: WLR Rapport 1525; Werkgroep richtlijnen emissies veehouderij, 2024) dat beschrijft hoe emissies uit stallen in het kader van een doelvoorschriftvergunning op een wetenschappelijk valide manier kunnen worden gemonitord;
- het geven van technisch of wetenschappelijk advies aan stakeholders, en;
- het uitvoeren van lab- en veldonderzoek naar gassensoren om de kwaliteit en beschikbaarheid van gassensoren te vergroten.

De onderhavige studie is uitgevoerd in het kader van de laatstgenoemde activiteit.

¹<https://open.overheid.nl/documenten/ronl-fe7d4eb2e82648d8d101100c859ab56aba6e74aa/pdf>. Zie pagina's 6-7.

²<https://www.rijksoverheid.nl/documenten/convenanten/2023/12/04/regie-om-sneller-te-innoveren-naar-een-duurzame-veehouderij>.

³https://www.tweedekamer.nl/kamerstukken/brieven_regering/detail?id=2024Z00907&did=2024D02159. Zie pagina's 6-8.

1.3 Validatie van gassensoren

Het Richtlijnen rapport bevat in deel D een validatieprocedure voor gassensoren. Met deze validatie wordt het 'proof of concept' geleverd voor een specifiek merk en type sensor om bij een bepaalde diercategorie of onder bepaalde condities tot betrouwbare resultaten te komen. Met andere woorden: het betreft een eenmalige haalbaarheidsstudie om aan te tonen dat een zeker sensortype geschikt is voor toepassing bij een bepaalde diercategorie of omstandigheden. Andere delen van het Richtlijnen rapport (delen A en C, in de toekomst mogelijk ook B) stellen het gebruik van gevalideerde sensoren verplicht en beschrijven de verdere kwaliteitsborging gedurende de praktische toepassing door meetbureaus of kennisinstellingen. De beschreven procedure bestaat uit een aantal optionele laboratoriumtests ⁴ en een verplichte veldtest. De veldtest bestaat eruit de sensor op tenminste vier bedrijfslocaties in te zetten en tenminste zesmaal per jaar en per locatie gelijktijdig een 24-uursmeting uit te voeren met de standaard referentiemethode (SRM) voor het betreffende gas. De kalibratie van de sensor aan de SRM vindt vervolgens plaats met orthogonale lineaire regressieanalyse.

1.4 Doel van deze studie

In dit rapport wordt de validatie beschreven van de Dräger Polytron® A500 met FL-sensorelement (eveneens bekend als de DOL 51) bij varkens. Het betreft een gassensor voor luchtconcentraties van ammoniak (NH₃). Voor deze validatie is gebruik gemaakt van de data uit het project 'Goed benutten biologische combi-luchtwassers' (Groot Wassink et al., 2025). In voornoemde studie is de Dräger Polytron® A500 met FL-sensorelement ingezet op vier bedrijfslocaties met varkens, zowel vóór de luchtwassers (ingående luchtstroom met relatief hoge concentraties) als ná de luchtwassers (uitgaande luchtstroom met relatief lage concentraties).

Het doel van deze studie was om het prestatieniveau van voornoemde sensor vast te stellen conform deel D van het Richtlijnen rapport. Bij een voldoende prestatieniveau kan de sensor – via een door de Rijksoverheid mogelijk vast te stellen 'whitelist' van gevalideerde sensortypen, via directe verwijzing naar de onderhavige publicatie, of anderszins – ingezet worden in emissie monitoring bij een doelvoorschriftvergunning of in meetcampagnes gericht op het verkrijgen van een algemene erkenning (emissiefactor, reductiepercentage).

⁴ De **respons tijd** als t_{90} , een kalibratie aan minimaal vier concentratiepunten van ijkgas in droge lucht, **herhaalbaarheid**, **instrumentherhaalbaarheid**, **detectielimiet**, **drukeffect**, **vocht- of temperatuurgevoeligheid**, gevoeligheid voor **interferenten** en bepaling van de **uitgebreide meetonzekerheid**.

2 Beschrijving onderzochte sensor: Dräger Polytron® A500/DOL 51

De Polytron® A500 is door de firma Dräger in eerste instantie ontwikkeld om in de uitgaande luchtstroom van luchtwassers te kunnen meten. De uitgaande luchtstroom van luchtwassers (maar ook de uitgaande luchtstroom van mestdroogtunnels, warmtewisselaars en biobedden) heeft doorgaans een hoge relatieve luchtvochtigheid (RV) of is zelfs verzadigd met waterdamp (RV ~ 100%). Om de hoge luchtvochtigheid in die luchtstroom te kunnen weerstaan is de sensor uitgevoerd met een verwarmde convectiekap. De verwarming in de convectiekap zorgt ervoor dat de luchttemperatuur met meer dan 10 graden Celsius stijgt, waardoor de relatieve luchtvochtigheid daalt. Door de lagere luchtvochtigheid treedt er geen condensatie van waterdamp meer op in de sensor. Verder zorgt de convectiekap er door de thermische werking voor dat er een relatief kleine luchtstroming ter hoogte van het sensorelement ontstaat, waardoor ook stofopbouw voorkomen kan worden. Om deze redenen raadt de fabrikant de sensor ook aan voor metingen in de ingaande luchtstroom van nageschakelde luchtreinigingstechnieken (voor bepaling van het verwijderingsrendement) of in de uitgaande luchtstroom bij directe emissiemetingen van stallen. Door het Deense bedrijf DOL, gespecialiseerd in de agrarische markt, wordt onder licentie exact dezelfde sensor verkocht als de DOL 51.

Vooralsnog wordt gebruik gemaakt van het FL-sensorelement, een elektrochemische cel met een meetbereik van 0 tot 50 ppm. Recent heeft Dräger ook het EL-sensorelement geïntroduceerd met een bereik van 0 tot 20 ppm die ook op de Polytron® A500/DOL 51 gebruikt zou kunnen worden. De toegevoegde waarde hiervan wordt – mede gezien de hogere prijs – momenteel onderzocht op de landelijke sensoronderzoekslocatie voor varkens, onderdeel van het landelijk coördinatorschap emissie monitoring. Op basis hiervan zal besloten worden of er redenen zijn om deze variant ook te gaan valideren.

De sensor heeft een externe stroomvoorziening nodig die 24 V elektrische spanning levert en wordt analoog uitgelezen middels een 0-10 V of 4-20 mA signaal. Dit betekent dat het belangrijk is dat er randapparatuur van voldoende kwaliteit toegepast wordt en er verschillen kunnen zijn in de tijdsfrequentie waarmee data gelogd wordt.

In de onderhavige studie werden de sensoren op de luchtwassers aangesloten en zo ook gelogd, met uitzondering van de meting voor het bepalen van de instrumentherhaalbaarheid. Logging door de luchtwassers vond plaats op uurbasis, met polling van de sensor eens per kwartier. Vanwege het benodigde grote aantal aansluitingen, werd voor de test op instrumentherhaalbaarheid een datalogger van WLR gebruikt (Koenders Instruments, Almere, Nederland gebaseerd op een CR1000X; Campbell Scientific Inc.; Logan UT, VS). De gebruikte dataloggers hadden een meetfrequentie van 10 seconden resulterend in een meetwaarde als gemiddelde van de voorafgaande 5 minuten.

Volgens fabrieksopgave is de onzekerheid van de sensor $\pm 1,5$ ppm of $\pm 10\%$ van de meetwaarde. Drift over de langere termijn zou kleiner dan $\pm 10\%$ moeten zijn en de responstijd tot de helft van de eindwaarde bereikt is ≤ 30 seconden. In deze studie werden deze prestatiekenmerken onafhankelijk vastgesteld.

In Figuur 2.1 wordt de datasheet van de Dräger A500 met volledige technische specificaties weergegeven.



Dräger Polytron A500 Ammonia monitoring in high-humidity environments

The Dräger Polytron A500 is a transmitter designed for long-term measurement of ammonia in environments with high humidity and/or dust levels. The special convection cap protects the associated electrochemical DrägerSensor NH₃ FL against external influences and ensures continuous NH₃ measurement under the specific conditions present in raw and clean gas in exhaust air scrubbing systems.

Dräger

Technology for Life

Dräger Polytron A500



Benefits

Durable sensor design enables continuous ammonia measurement in exhaust air

The Dräger Polytron A500 is especially resilient when used in the demanding conditions found in exhaust air treatment systems/air scrubbers or similar end-of-pipe scenarios. The convection cap with integrated heating enables the long-term stable DrägerSensor NH₃ FL to deliver accurate, drift-free measurements, even with temperature fluctuations, humid ambient air with up to 100% relative humidity, corrosive spray mist, high velocity airflow and heavy dust exposure. The sensor is highly stable over time, eliminating the need for recalibration.

Precise real-time measurements with high resolution

The DrägerSensor NH₃ FL measures ammonia in the 0 - 50 ppm range with high precision and a resolution of 0.15 ppm. The Polytron A500 sensor head outputs a real-time signal via its analogue interface, either 0 - 10 V or 4...20 mA. This allows the device to be connected to standard evaluation units, data loggers and control systems used in exhaust air treatment plants.

Simple installation and low maintenance

The Polytron A500 is suitable for a wide range of air cleaning system types. It is installed directly within the system. The hanging bracket ensures the transmitter is positioned vertically, allowing the sensor to perform optimally. The Polytron A500 also indicates when the sensor needs replacing. Between replacements, the transmitter is maintenance-free. This makes it suitable for a wide range of quality-assured measurement tasks.

Measuring separation efficiency with a dual-sensor setup

Using two Polytron A500 units makes it possible to continuously monitor the difference between raw gas and clean gas concentrations at the measurement site. To do this, one Polytron A500 with ammonia sensor is placed in the raw gas flow or upstream of the first filtration stage, and the other in the clean gas stream after the last relevant filter stage. This provides a clear indication of the system's separation efficiency, and enables direct monitoring of NH₃ reduction.

Optimising exhaust air cleaning system operation using measured emissions data

The Polytron A500 supports the monitoring and control of both performance and efficiency in existing and new air cleaning systems. It delivers real-time data that helps you optimise operating parameters while controlling ammonia emissions.

Accessories



Test gas cylinder 60 L 50 ppm NH₃

The test gas cylinder is used to check the sensor.



Test gas cylinder (112 L synthetic air)

The test gas cylinder with synthetic air is used to establish a zero point when testing the sensor.



Control valve basic 0.5 L/min

The basic 0.5 L/min regulator is required to control the gas flow from the test gas cylinders.



Gas supply adapter

The gas supply adapter is required when using test gas cylinders when purging the sensor with test gas.

Technical Data

Dräger Polytron A500

Warranty on sensor and sensor head	1 year from date of delivery
Expected sensor service life	24 months from commissioning
Supply voltage	Nominal voltage 24 V (22 V to 26 V DC); DC ripple < 0.2 V _{ss}
Current consumption	< 200 mA
Signal output to evaluation unit	4...20 mA or 0...10 V
Measuring range	0 to 50 ppm NH ₃
Signal transmission resolution	0.15 ppm
Accuracy	1.5 ppm or ± 10% of reading (at 0-50 °C)
Sensor response time T ₉₀	≤ 45 s
Long-term drift	< ± 10% of reading/year
Cross-sensitivities	negligible in standard applications, available on request
Cable type	five-core
Temperature range	0 to 50 °C (32 to 122 °F)
Air humidity	15% to 100% relative humidity
Atmospheric pressure	700 to 1,300 hPa
Dimensions (W x H x D)	75 mm x 225 mm x 75 mm
Housing material, sensor	PA
Weight	approx. 600 g (1.3 lbs)
Chemical resistance	typical cleaning agents, disinfectants, alcohols, surfactants, peracetic acid, soaps
Protection class	IP65
Electrical safety	CE labelling

Dräger Polytron A500 | 06

Ordering Information

Dräger Polytron A500

Dräger Polytron A500	6800283
DrägerSensor NH ₃ FL	6813260
Dust filter (pack of 5)	6813989
Test gas cylinder 60 L 50 ppm NH ₃	6811352
Test gas cylinder (112 L synthetic air)	6813239
Basic regulator 0.5 L/min	6813104
Calibration adapter incl. 1 m hose	6810536

Dräger Polytron A500 | 06

Not all products, features, or services are for sale in all countries. Trademarks mentioned herein are the property of its respective owner. Trademarks may be owned by Drägerwerk AG & Co. KGaA (Dräger) or its affiliates in certain countries and not necessarily in the country in which this material is released. Visit www.draeger.com/trademarks for the current status of Dräger's trademarks.

Corporate Headquarters
Drägerwerk AG & Co. KGaA
Hölsinger Allee 53-55
23558 Lübeck, Germany
www.draeger.com

Region Europe
Dräger Safety AG & Co. KGaA
Revalstraße 1
23560 Lübeck, Germany
☎ +49 451 882 0
☎ +49 451 882 2080
✉ info@draeger.com

Region Middle East, Africa
Dräger Safety AG & Co. KGaA
Branch Office
P.O. Box 50308
Dubai, United Arab Emirates
☎ +971 4 4294 600
☎ +971 4 4294 499
✉ contactuae@draeger.com

Region Asia Pacific
Dräger Singapore Pte. Ltd.
41 Science Park Road
The Oval 804-01
Singapore 117625
☎ +65 6872 9288
✉ +65 6299 0398

Region Central and South America
Dräger Safety do Brasil Ltda.
AL Pucuru, 51/61 - Tamboré
04440-500 Barueri, São Paulo
☎ +55 (11) 4687-4900
✉ relacionamento@draeger.com



Locate your Regional Sales Representative at:
www.draeger.com/contact

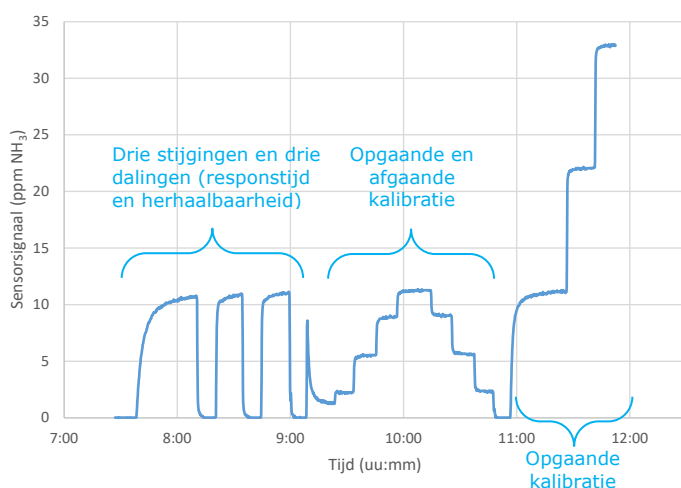
1028161 (2/21) Subject to our standard terms and conditions | © 2021 Drägerwerk AG & Co. KGaA

Figuur 2.1 De datasheet (zeven pagina's) van de onderzochte sensor.

3 Werkwijzen en resultaten labtests voorafgaand aan de veldmetingen

In deel D van het Richtlijnen rapport (Werkgroep richtlijnen emissies veehouderij, 2024) worden zowel optionele (initiële en aanvullende) labtests als verplichte veldtests beschreven. Binnen de scope van het project 'Goed benutten biologische combi-luchtwassers' (Groot Wassink et al., 2025), waarvan de data gebruikt werd voor de onderhavige studie, vonden geen uitgebreide labtests plaats, maar werden wel de meest belangrijke tests uitgevoerd als onderdeel van de standaard ingangscontrolle van nieuw aangeschafte sensoren door het Air Quality Lab van Wageningen Livestock Research. Deze tests worden in dit hoofdstuk beschreven.

Wanneer er labtests uitgevoerd worden moeten deze volgens het Richtlijnen rapport in ieder geval de initiële testen op **respons tijd**, **kalibratie** (inclusief berekening van de **uitgebreide meetonzekerheid U(lof)**), **herhaalbaarheid**, **instrumentherhaalbaarheid** en **detectielimiet** omvatten. Verder worden aanvullende testen voor de effecten van **druk**, **temperatuur**, **vocht** of **interferenten** (stoorcomponenten) beschreven. Gezien het elektrochemische meetprincipe en de verwarmde uitvoering van de sensor in de onderhavige studie lijken de aanvullende testen voor temperatuur en vocht weinig relevant en ook niet uitgevoerd. Tests voor druk en interferenten zijn mogelijk wel van belang, en zullen eventueel in een vervolg geadresseerd moeten worden. Figuur 3.1 toont een voorbeeld van een ingangscontrolle uitgevoerd voorafgaand aan de inzet van het instrument in het veld.



Figuur 3.1 Grafisch voorbeeld van een ingangscontrolle, hier van Dräger A500 sensor nummer 7 die geplaatst werd op locatie 4 na de luchtwasser. De Y-as geeft het door de datalogger geregistreerde signaal in ppm NH₃ weer. De x-as geeft de tijd weer waarop de ingangscontrolle werd uitgevoerd.

Er werd een spanwaarde van ~ 10 ppm aangehouden met het oog op mogelijke plaatsing van de sensor voor of achter de luchtwasser en daarmee het verschil in te meten bereik. Om de respons tijd en herhaalbaarheid te bepalen, werd eerst drie keer afwisselend de nulwaarde (0 ppm) en spanwaarde (10 ppm) aangeboden. Vervolgens werd op- en afgaand gekalibreerd (~ 1, 2, 5, 8 en 10 ppm) om een kalibratiefunctie voor dit bereik te bepalen. Tenslotte is een aantal hogere ammoniakconcentraties aangeboden om dit ook voor een hoger concentratiebereik te doen (~ 10, 20 en 30 ppm). In Tabel 3.1 zijn de resultaten samengevat. Hierna worden ze per labtest in afzonderlijke paragrafen besproken.

Tabel 3.1 Resultaten van de labtests tijdens de ingangscontrole.

Sensor	Responstijd	Kalibratie		Herhaal- baarheid als stdev: s _r	Instrument- herhaalb.	Detectie- limiet	Meet- onzeker- heid u(lof)	Uitgebreide meet- onzekerheid
		Functie	R ²					
	[min]	[ppm]	[-]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]
Voor de water		0-30 ppm						
● Locatie 1	2,0	Y=0,91x – 0,04	1,00	0,08	-	0,00	0,13	0,26
● Locatie 2	4,0	Y=0,90x – 0,02	1,00	0,13	-	0,02	0,08	0,16
● Locatie 3	2,0	Y=0,90x – 0,01	1,00	0,20	-	0,03	0,09	0,18
● Locatie 4	2,0	Y=0,94x + 0,08	1,00	0,15	-	0,00	0,08	0,16
Na de water		0-10 ppm						
● Locatie 1	3,0	Y=0,92x + 0,10	1,00	0,09	-	0,00	0,17	0,34
● Locatie 2	1,0	Y=0,94x – 0,08	1,00	6,42 ^{a)}	-	0,89 ^{a)}	0,10	0,20
● Locatie 3	2,0	Y=0,90x – 0,17	1,00	0,16	-	0,00	0,10	0,20
● Locatie 4	2,0	Y=0,94x – 0,07	1,00	0,17	-	0,01	0,07	0,14
Alle sensoren	-	-	-	-	1,0	-	-	-
Criterium	≤15	n.v.t.	n.v.t.	5% van bovenwaarde 95%-range	5% van bovenwaarde 95%-range	< 1 ppm ^{b)} < 0,05 ppm ^{c)}	Geen	Geen

^{a)} veroorzaakt door een fout in de testopstelling.

^{b)} voor hoge concentraties in de ingaande lucht van de luchtwasser (afkomstig vanuit de stal).

^{c)} voor lage concentraties in de uitgaande lucht van de luchtwasser (gereinigde lucht).

3.1 Responstijd

De responstijd is de tijd die benodigd is om 90% van de span- of nulwaarde te bereiken (ook wel bekend als t_{90}).

De responstijd is conform deel D van het Richtlijnen rapport bepaald als het gemiddelde van drie stijgtijden, drie daaltijden, en in totaal dus zes stijg- en daaltijden.

De responstijden van de geteste sensoren varieerden tussen 1 en 4 minuten (Tabel 3.1). Het Richtlijnen rapport stelt hiervoor als criterium maximaal 15 minuten. **Alle acht geteste sensoren voldoen aan het criterium voor responstijd.**

3.2 Kalibratie: kalibratiefuncties en onzekerheid

Met een kalibratie worden gemeten waarden van een meetinstrument, in dit geval een sensor, vergeleken met bekende, geaccepteerde waarden van een standaard. Bij een labkalibratie is de standaard het doelgas uit een gascilinder dat tot een gewenste, bekende concentratie is verdund en als 'werkelijke waarde' wordt aangeboden aan de sensor. De relatie tussen de aangeboden concentratie en de door de sensor gemeten concentratie is bepaald met (conventionele; ordinary least squares) lineaire regressieanalyse. In de analyse is de aangeboden concentratie de Y-variabele en de sensorconcentratie de x-variabele. De analyse produceert een kalibratiefunctie van het type $Y = a \cdot x + b$. Daarin is a de hellingshoek (de gemiddelde verandering van Y wanneer x met één eenheid toeneemt; ook wel 'richtingscoëfficiënt' of 'slope' genoemd) en b het afsnijpunt van de functie met de Y-as (de gemiddelde waarde van Y bij $x = \text{nul}$; ook wel 'snijpunt' of 'intercept' genoemd). De R^2 beschrijft de fractie verklaarde variantie in de respons door de verklarende variabele. Bij een perfecte 1-op-1 relatie tussen aangeboden concentratie en sensorconcentratie heeft a de waarde één, b de waarde nul en de R^2 de waarde één.

In de test werden zeven verschillende concentraties aangeboden, namelijk: 1, 2, 5, 8 en 10 ppm en vervolgens 10, 20 en 30 ppm (zie ook de vorige pagina). Uit Tabel 3.1 blijkt dat verschillen tussen sensoren en verschillen in de bereiken beperkt zijn (duidend op onderlinge consistentie over een relatief groot meetbereik). Gezien de van één afwijkende helling is het toepassen van een correctie echter noodzakelijk.

Als criterium voor de fit geeft deel D van het Richtlijnen rapport aan dat de uitgebreide onzekerheid $U(\text{lof})$ kleiner dient te zijn dan 8% van de spanwaarde. Dit is tweezijdig, dus de waarden uit Tabel 3.1 moeten vermenigvuldigd worden met een dekkingsfactor twee. De lack-of-fit komt daarmee uit op maximaal 0,34 ppm wat bij een span van ~ 10 ppm een fout van 3,4% betekent. **De sensor voldoet aan het criterium voor de uitgebreide onzekerheid.**

3.3 Herhaalbaarheid

De herhaalbaarheid is de mate waarin éénzelfde meetinstrument bij herhaald meten van dezelfde waarde van een grootheid (in dit geval de ammoniakconcentratie) onder dezelfde omstandigheden consistente resultaten geeft. De herhaalbaarheid is daarmee een maat voor de stabiliteit (toevallige meetfouten) van de meetmethode. Conform deel D van het Richtlijnen rapport werd de herhaalbaarheid bepaald door driemaal de nulwaarde en spanwaarde te meten met dezelfde sensor. De herhaalbaarheid wordt uitgedrukt als standaardafwijking.

Uit Tabel 3.1 blijkt dat de S_r op de spanwaarde steeds onder de 0,2 ppm lag (behoudens een test met een fout in de meetopstelling).

Toetsing van de gemeten herhaalbaarheid aan het criterium voor herhaalbaarheid vindt plaats door $t_{(a; df=n-1)} \cdot \sqrt{2s_r}$ waarbij t de waarde is uit de Student's t -verdeling bij een overschrijdingskans a , df het aantal vrijheidsgraden, en n het aantal waarnemingen. Bij een overschrijdingskans van 0,05 en drie waarnemingen per sensor ($n=3$) en dus $(3-1=)$ twee vrijheidsgraden, is de t -waarde 2,920. De toetswaarde voor de herhaalbaarheid berekend als $t\sqrt{2s_r}$ komt dan uit op 0,83 ppm. Deze waarde moet vergeleken worden aan een criterium. Het criterium bedraagt 5% van bovenkant van het 95%-bereik vermeld in Tabel 2.1 van deel D van het Richtlijnen rapport voor de concentratie van ammoniak in varkensstallen. Het criterium komt daarmee uit op $(35,0 \text{ ppm} \times 5\%) = 1,75 \text{ ppm}$. **De sensor voldoet voor de ingaande luchtstroom aan het criterium voor herhaalbaarheid.** Na de luchtwasser zijn uiteraard beduidend lagere concentraties te verwachten, hier wordt het herhaalbaarheids criterium niet gehaald.

3.4 Instrumentherhaalbaarheid

De instrumentherhaalbaarheid is de mate waarin meerdere meetinstrumenten van hetzelfde type bij het meten van dezelfde waarde van een grootheid (in dit geval de ammoniakconcentratie) onder dezelfde omstandigheden consistente resultaten geeft. De herhaalbaarheid is daarmee een maat voor de stabiliteit tussen meetinstrumenten.

Zeven van de acht gebruikte sensoren ondergingen tegelijkertijd de ingangscontrole en deze data werden benut voor het bepalen van de instrumentherhaalbaarheid. Hiertoe werden uurwaarden ($n=4$) tijdens de ingangscontrole berekend, en op dezelfde manier als hierboven, de instrumentherhaalbaarheid over deze uren. De instrumentherhaalbaarheid (als standaardafwijking) nam toe met de gemiddelde sensorrespons (ammoniakconcentratie). De hoogste waarde bedroeg 1,0 ppm bij een gemiddelde sensorrespons van 13,6 ppm.

Het criterium voor instrumentherhaalbaarheid is gelijk aan dat van de herhaalbaarheid (zie paragraaf 3.3), oftewel 1,75 ppm. **De sensoren voldoen aan het criterium voor instrumentherhaalbaarheid.**

3.5 Detectielimiet

De detectielimiet van een meetinstrument geeft de kleinste verandering in signaal of concentratie aan, die nog betrouwbaar kan worden gedetecteerd door dat instrument. De detectielimiet wordt berekend als nul plus driemaal de standaardafwijking in de sensorwaarde bij het aanbieden van de nulconcentratie ijkgas. Het kunnen detecteren van veranderingen in de gemeten waarde wil overigens nog niet zeggen dat grootte hiervan vastgesteld kan worden. Om een verschil in concentratie te kunnen kwantificeren, moeten deze tienmaal de standaardafwijking uit elkaar liggen. Tevens kan de detectielimiet beïnvloed worden door de resolutie van het sensorsignaal, waardoor deze lager kan uitvallen dan werkelijk het geval is.

Uit Tabel 3.1 blijkt dat de detectielimieten in de ppb-range (0,00 tot 0,03 ppm) liggen.

Het criterium voor de detectielimiet voor ammoniak en bij varkens is in het Richtlijnen rapport gesteld op 1,0 ppm. **De sensor voldoet aan het criterium voor de detectielimiet voor de ingaande lucht van luchtwassers** (lucht afkomstig uit de stal). Dit criterium is niet zonder meer toepasbaar bij de lagere concentraties in de uitgaande lucht van luchtwassers. Het Richtlijnen rapport geeft hiervoor nog geen criterium. Hiervoor zou een naar rato lagere detectielimiet kunnen worden aangehouden. De verwijdering van ammoniak bij luchtwassers in bijlage VI bij de Omgevingsregeling ligt tussen waarden van 67 en 95%. Het criterium voor de detectielimiet voor de uitgaande lucht van luchtwassers wordt dan $((1-0,67) \times 1,0 \text{ ppm} =) 0,33 \text{ ppm}$ tot $((1-0,95) \times 1,0 \text{ ppm} =) 0,05 \text{ ppm}$. De waarden in Tabel 3.1 liggen beneden beide criteria **De sensor voldoet aan het hier aangehouden criterium voor de detectielimiet voor de uitgaande lucht van luchtwassers** (gereinigde lucht).

3.6 Uitgebreide meetonzekerheid

De uitgebreide meetonzekerheid beschrijft het interval rondom de gemeten waarde waarbinnen de werkelijke waarde met een bepaalde mate van zekerheid wordt verwacht te liggen. Zoals beschreven in het Richtlijnen rapport wordt deze grootheid berekend uit de standaardafwijkingen van alle bekende onzekerheidsbronnen: de lack-of-fit in de kalibratiefunctie U_{lof} en de onzekerheden door effecten van luchtdruk, temperatuur, luchtvochtigheid en eventuele stoorcomponenten. Deze individuele standaardafwijkingen worden gekwadrateerd, opgeteld, daarna geworteld, en tot slot vermenigvuldigd met een dekkingsfactor 2. De werkelijke waarde ligt dan met ongeveer 95% zekerheid tussen de gemeten waarde $\pm$ de uitgebreide meetonzekerheid. Hoe kleiner de uitgebreide meetonzekerheid, hoe smaller dus het interval rond de gemeten waarde en hoe zekerder de gemeten waarde is.

De uitgebreide meetonzekerheid is hier alleen bepaald op basis van U_{lof} . Effecten van luchttemperatuur en luchtvochtigheid zijn naar verwachting verwaarloosbaar en de datasheet (zie Figuur 2.1) vermeldt geen effect van luchtdruk of specifieke stoorcomponenten. Als dit wel een rol speelt zal dat in de veldkalibratie tot uitdrukking komen. Uit Tabel 3.1 blijkt dat voor de sensor met de grootste U_{lof} is de uitgebreide meetonzekerheid $(2 \times 0,17 =) 0,34 \text{ ppm}$ bedraagt. Voor deze grootheid is geen criterium opgenomen in het Richtlijnen rapport.

4 Werkwijze en resultaten veldtests

4.1 Verloop veldmetingen, databeschikbaarheid en outliers

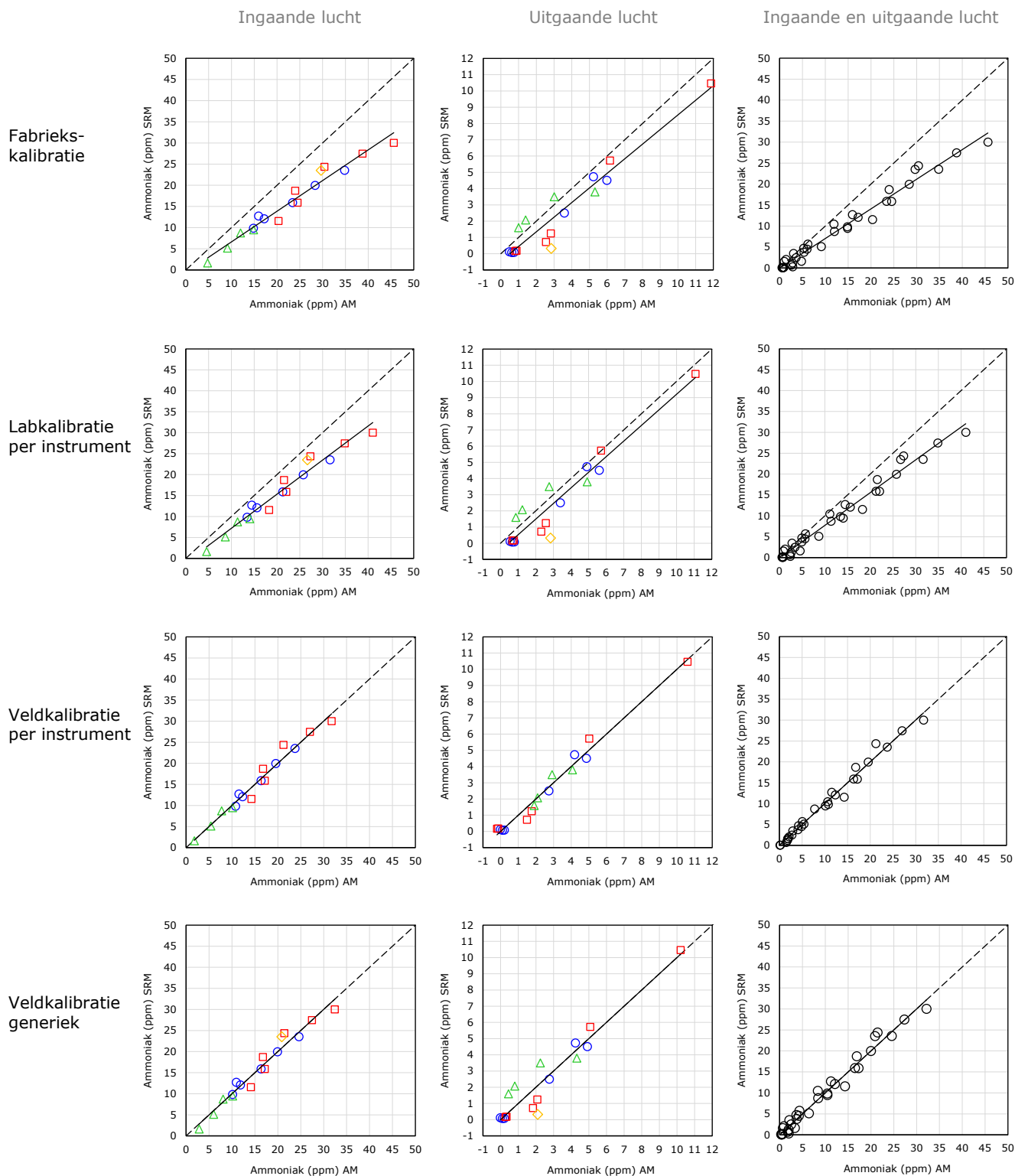
Voor de sensormetingen in het veld is een standaard proefopzet gevolgd, waarbij tweemaandelijks metingen met de standaard referentiemethode (SRM) zijn uitgevoerd zoals beschreven door Mosquera et al. (2019). De sensoren werden geplaatst in de drukkamer van de luchtwasser (ingaaende lucht) en in kokers op het waspakket (uitgaande lucht). Hierin werden tevens monsternameleidingen gemonteerd leidend naar de impingers in een technische ruimte. Omdat inregelen van onder meer de datalogging enige tijd in beslag nam begon dit later dan eigenlijk bedoeld en teneinde referentiemetingen over het gehele jaar te hebben werd het project zoals beschreven door Groot Wassink et al. (2025) verlengd, om deze validatie mogelijk te maken. Daarnaast is een (korte) onderlinge vergelijking van de sensoren in het veld georganiseerd om de instrumentherhaalbaarheid vast te kunnen stellen. Tezamen vormen deze de validatie onder praktijkomstandigheden.

De resultaten van de veldtests staan weergegeven in Tabel 4.1, Figuur 4.1 en Tabel 4.2. Voorziene referentiemetingen konden op één na uitgevoerd worden, dit betrof een ontbrekende referentiemeting op locatie 3. De reden hiervoor was dat bedrijfsactiviteiten op de betreffende locatie werden gestaakt. De sensoren maakten wel een meetjaar vol. Op deze locatie waren er ook problemen met de datalogging, waardoor uiteindelijk slechts een enkel datapaar AM-SRM beschikbaar is gekomen. Dit speelde ook op locatie 4, waardoor daar twee dataparen verloren gingen. Om voornoemde redenen komt de totale databeschikbaarheid uit op $(34/48 \times 100 =)$ 71%, terwijl 80% (en minimaal vier waarnemingen per locatie) verlangd kan worden. In deel D van het Richtlijnen rapport (Werkgroep richtlijnen emissies veehouderij, 2024) wordt dit niet nader gespecificeerd, echter in andere delen wordt dit wel als criterium gesteld.

Een beschrijvende data-analyse leverde zowel bij de sensormetingen als de referentiemetingen geen outliers op. Alle data zijn daarom in de validatie gebruikt, zowel voor de ingaande luchtstroom ($n=17$), de uitgaande luchtstroom ($n=17$) en de ingaande en uitgaande luchtstroom gecombineerd ($n=34$).

Tabel 4.1 Resultaten veldvalidatie: aantallen metingen, concentratiebereik, databeschikbaarheid en kalibratiefuncties per sensorinstrument.

Kenmerk	Eenheid	Locatie								Criterium	Voldoet?
		1 in	1 uit	2 in	2 uit	3 in	3 uit	4 in	4 uit		
Meetdagen	n	556	556	497	497	379	379	509	509	365	Ja
SRM metingen in duplo	n	6	6	6	6	5	5	6	6	≥ 6	Ja
Totaal SRM metingen	n	12	12	12	12	10	10	12	12	-	n.v.t.
- Waarvan mislukt	n	-	-	-	-	-	1	-	-	-	n.v.t.
- Waarvan outliers	n	-	-	-	-	-	-	-	-	-	n.v.t.
Concentratiebereik [min; max]	ppm	[9,84; 23,56]	[0,08; 4,79]	[11,57; 32,82]	[0,17; 11,02]	[7,86; 23,56]	[0,13; 12,46]	[1,55; 9,57]	[0,59; 4,29]	-	n.v.t.
AM-metingen in simplo	n	6	6	6	6	1	1	4	4	4 x 6	Nee
Kalibratiefunctie (apparaat specifiek; uit conventionele lineaire regressieanalyse)	-	0,648x + 1,18	0,888x - 0,45	0,692x + 0,18	0,977x - 1,00	-	-	0,823x - 2,12	0,505x + 1,39	-	n.v.t.



Figuur 4.1 Vergelijkingen tussen de sensor (alternatieve methode, AM; op de x-as) en de standaard referentiemethode voor ammoniak (SRM; op de Y-as). In de drie kolommen (van links naar rechts): de sensoren vóór de luchtwassers, de sensoren ná de luchtwassers en de combinatie van beide. In de rijen (van boven naar beneden): met de AM na fabriekskalibratie, na labkalibratie met droog ijkgas uit een cilinder in het Air Quality Lab van Wageningen Livestock Research, na instrument-specifiek veldkalibratie, en na generieke veldkalibratie. De vier varkensbedrijven zijn weergegeven als blauwe cirkel (bedrijf 1), rood vierkant (bedrijf 2), oranje ruit (bedrijf 3) en groene driehoek (bedrijf 4).

Tabel 4.2 Resultaten veldvalidatie: correlatiecoëfficiënt, helling en afsnijpunt bepaald met orthogonale regressie tussen de alternatieve methode (sensor) en standaard referentiemethode, na toepassing van de correctiefunctie verkregen uit de veldkalibratie: voor de vier sensoren in de ingaande luchtstroom, voor de vier sensoren in de uitgaande luchtstroom, en van alle acht sensoren tezamen.

Kenmerk uit orthogonale regressie	Eenheid	Sensoren (positie)		
		in ^{a)}	uit ^{b)}	in+uit ^{c)}
Correlatiecoëfficiënt (r)	-	0,980	0,955	0,989
Criterium		≥ 0,97	≥ 0,97	≥ 0,97
Voldoet?		Ja	Nee	Ja
Helling	-	1,021	1,049	1,011
Criterium		≥ 0,475 ≤ 1,525	≥ -0,136 ≤ 2,136	≥ 0.0586 ≤ 1,942
Voldoet?		Ja	Ja	Ja
Afsnijpunt	ppm	-0,33	-0,12	-0,10
Criterium		≥ -0,525 ≤ 0,525	≥ -1,136 ≤ 1,136	≥ -0,942 ≤ 0,942
Voldoet?		Ja	Ja	Ja
Instrumentherhaalbaarheid		13,92	11,86	38,75
Criterium		≥ 11,594 ≤ 17,391	≥ 2,331 ≤ 3,500	≥ 7,013 ≤ 10,520
Voldoet?		Ja	Nee	Nee

^{a)} na toepassing van de correctiefunctie uit de veldkalibratie: $Y = 0,724x - 0,62$

^{b)} na toepassing van de correctiefunctie uit de veldkalibratie: $Y = 0,90x - 0,45$

^{c)} na toepassing van de correctiefunctie uit de veldkalibratie: $Y = 0,706x - 0,02$

4.2 Veldkalibratie

Figuur 4.1 toont de vergelijkingen tussen de sensor en de standaard referentiemethode in de veldvalidatie. De eerste rij figuren toont vergelijkingen voor de waarden die de sensor af fabriek aangaf. Sensoren worden afgeregeld voor het analoge signaal geleverd, wat als een fabriekskalibratie kan worden gezien. Vervolgens ondergaan ze een ingangscontrole met labkalibratie in het Air Quality Lab van Wageningen Livestock Research waaruit een initiële correctie wordt bepaald (zie Tabel 3.1). De sensoren meten af fabriek te hoog, mogelijk te verklaren door het beoogde gebruik in de veiligheidssfeer. Toepassing van een correctie op basis van de labkalibratie met droog ijkgas uit een cilinder verkleint deze overschatting, maar niet voldoende. Toepassing van de veldkalibratie op basis van de SRM herstelt de overschatting (helling van ongeveer één en een afsnijpunt van ongeveer nul). Een generieke correctiefunctie (op basis van de groep van sensoren bij vier varkensbedrijven) presteert vergelijkbaar als sensor-/locatiespecifieke correctiefuncties (Figuur 4.1).

Tabel 4.2 toont de correlatiecoëfficiënt, helling en afsnijpunt van de relatie tussen sensor en SRM zoals bepaald met orthogonale regressie nadat de sensorwaarden zijn gecorrigeerd met de correctiefuncties uit de veldkalibratie. De regressie op basis van de gepoolde dataset ("in+uit") van 8 sensoren voldoet aan de criteria.

4.3 Instrumentherhaalbaarheid na afloop veldmetingen

De instrumentherhaalbaarheid is getoetst op basis van het criterium dat AM en SRM binnen 20% van elkaar blijven. Hiertoe werd het gemiddelde van de vier referentiemetingen berekend en vergeleken met de veldkalibraties gecorrigeerde dagwaardes van de sensoren. Locatie 3 kon door de ontbrekende veldkalibratie niet worden meegenomen in de berekening. Op basis van het ruwe signaal wordt verwacht dat de sensor voor de luchtwasser net als de andere zal voldoen aan het criterium voor instrumentherhaalbaarheid. Achter de luchtwasser wordt de gewenste herhaalbaarheid niet gehaald. Eén hiervan had een defect sensorelement (afkomstig van locatie 2) en produceerde in het geheel geen bruikbare data meer. Twee anderen vertoonden

een inconsistent beeld. Hierdoor voldoet ook de instrumentherhaalbaarheid voor de combinatie van sensoren in de in- en uitgaande lucht niet meer.

5 Werkwijzen en resultaten labtests na afloop van de veldmetingen

Na afloop van de veldmetingen zoals beschreven in hoofdstuk 4 zijn de sensoren teruggehaald naar het Air Quality Lab van Wageningen Livestock Research en daar nogmaals onderworpen aan de labtests zoals die ook voorafgaand aan de veldmetingen zijn uitgevoerd en gerapporteerd in hoofdstuk 3.

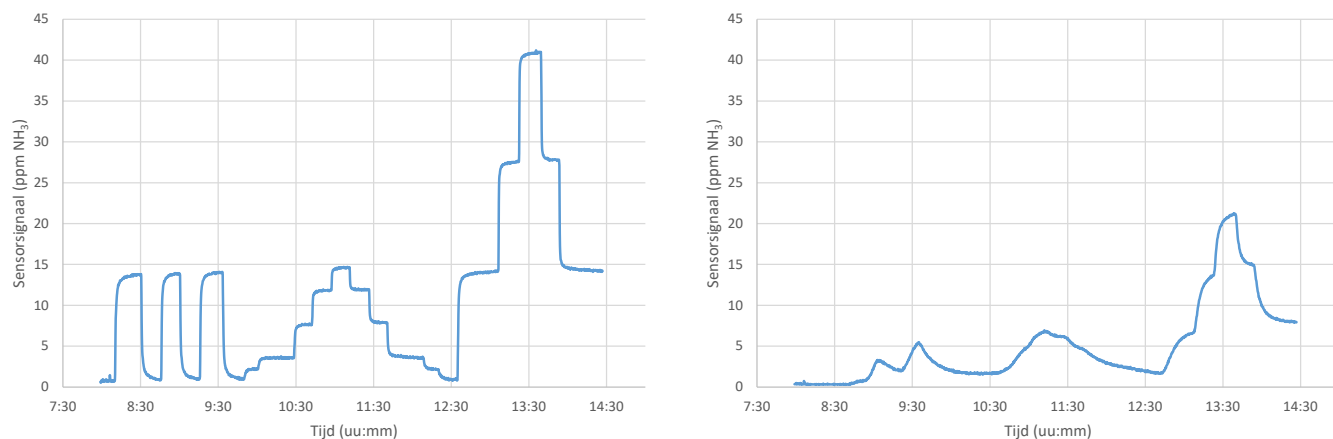
Hoofdstuk 4 over de veldtests sloot af met de bevinding dat van de sensoren die ingezet waren in de uitgaande lucht van de luchtwasser één een defect sensorelement had en geen bruikbare data meer produceerde en twee data met een inconsistent beeld produceerden. Na manipulatie in het lab leverde de defecte sensor weer data maar de labtests na afloop van de veldmetingen bevestigen dat de sensorelementen aan vervanging toe waren, zie Tabel 5.1 en Figuur 5.1. In hoeverre sensoren als geheel dan weer goed functioneren is in dit kader verder niet onderzocht, maar zou blijken uit de labtests bij een hernieuwde ingangsc controle.

Tabel 5.1 Resultaten van de labtests tijdens de uitgangsc controle.

Sensor	Responstijd	Kalibratie		Herhaal- baarheid als stdev: S _r	Instrument- herhaalb.	Detectie- limiet	Meet- onzekerheid u(lof)	Uitgebreide meet- onzekerheid
		Functie	R ²					
	[min]	[ppm]	[-]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]
Voor de wasser		0-30 ppm						
● Locatie 1	2,0	Y=0,73x – 0,67	1,00	0,15	-	0,45	0,05	0,10
● Locatie 2	2,0	Y=0,75x – 0,67	1,00	0,09	-	0,14	0,07	0,14
● Locatie 3	2,0	Y=0,76x – 0,39	1,00	0,04	-	0,08	0,04	0,08
● Locatie 4	2,0	Y=0,75x – 0,16	1,00	0,05	-	0,08	0,04	0,08
Na de wasser		0-10 ppm						
● Locatie 1	4,0	Y=1,67x – 1,80	0,76	2,41	-	3,08	1,83	3,66
● Locatie 2	n.t.b.	Y=2,07x – 1,25	0,42	0,83	-	1,46	2,38	4,76
● Locatie 3	5,0	Y=2,94x – 2,27	0,82	1,28	-	1,90	1,44	2,88
● Locatie 4	3,0	Y=0,77x + 0,34	1,00	0,03	-	0,00	0,26	0,52
Alle sensoren	-	-	-	-	5,9	-	-	-
Criterium	≤15	n.v.t.	n.v.t.	5% van bovenwaarde 95%-range	5% van bovenwaarde 95%-range	< 1 ppm ^{a)} < 0,05 ppm ^{b)}	Geen	Geen

^{a)} voor hoge concentraties in de ingaande lucht van de luchtwasser (afkomstig vanuit de stal).

^{b)} voor lage concentraties in de uitgaande lucht van de luchtwasser (gereinigde lucht).



Figuur 5.1 Grafische voorbeelden van de uitgangscntrole, links van de sensor in de ingaande en rechts de uitgaande lucht van de luchtwasser op locatie 1 (respectievelijk sensor nummer 2 en 1). Duidelijk te zien is dat sensorelement van de laatste het einde van de levensduur bereikt heeft. De Y-as geeft door datalogger geregistreerd signaal in ppm NH_3 weer. De x-as geeft de tijd weer waarop de uitgangscntrole werd uitgevoerd.

Vergelijking van Tabel 3.1 en 5.1 wijst op een in de tijd veranderende helling oftewel lange termijn drift. De kalibratieconstanten (helling en afsnijpunt) blijven onderling en ook voor/na de wasser echter consistent. Met uitzondering van de sensoren met een te vervangen sensorelement blijven responstijd, lack-of-fit van de kalibratie, herhaalbaarheid, detectielimiet en meetonzekerheid voldoen aan hun criteria. Instrumentherhaalbaarheid kon niet goed bepaald worden omdat de drie sensoren die niet goed meer functioneerden buiten beschouwing moesten worden gelaten, en de resterende exemplaren over twee kalibratiebatches verdeeld waren. Hierdoor werd het aantal vrijheidsgraden klein en daarmee de t-waardes hoog, waardoor het criterium van 1,75 ppm wordt overschreden (maximaal 5,9 ppm bij een uurwaarde van 28,0 ppm).

6 Discussie

In dit hoofdstuk worden bevindingen omtrent de validatie van de Dräger Polytron® A500 FL/DOL 51 zowel in het lab als het veld samengevat, zo mogelijk verklaard en geduid in breder perspectief.

6.1 Dräger Polytron® A500/DOL 51 en Dräger Polytron® C300/DOL 53

De A500 sensor is bedoeld om te functioneren onder de veeleisende omstandigheden die achter een luchtwasser optreden. Omdat de verwarmde convectiekap tevens opbouw van stof tegengaat, adviseert de fabrikant deze sensor ook voor metingen in de ingaande luchtstroom of emissiemetingen in het dierverblijf zelf. Voor het laatste wordt nu vaak de Dräger Polytron® C300/DOL 53 toegepast welke eveneens gevalideerd moet worden. Gegeven het grotere meetbereik van de C300 sensor (0-100 ppm tegenover 0-50 ppm voor de A500) zal deze sensor in ieder geval een lagere resolutie hebben wat toepassing bij lagere concentraties (zoals in natuurlijk geventileerde stallen voor melkkoeien) uitdagender maakt. Anderzijds zal moeten blijken of toepassing van het gevoeliger EL sensorelement (0-20 ppm) op de A500 van meerwaarde is, bijvoorbeeld in omstandigheden waar zeer lage concentraties worden verwacht.

6.2 Labtests ingangscontrole (voorafgaand aan inzet in het veld)

Tijdens de ingangscontrole worden de belangrijkste prestatiekenmerken (responstijd, kalibratie, herhaalbaarheid, detectielimiet) beproefd. Aan de criteria uit het Richtlijnen rapport voor deze aspecten werd ruim voldaan. Op basis van de beschikbare gegevens werd aanvullend de instrumentherhaalbaarheid berekend. De beschreven werkwijze hiervoor gaat uit van uurwaarden tijdens de kalibratie, wat resulteert in een aantal herhaalbaarheden. Normaal gesproken zal het uur met de hoogste gemiddelde concentratie ook het grootste verschil tussen sensoren hebben. Hier bestaat dus ruimte om de procedure eenduidiger te maken dan wel te versimpelen. Verder is het criterium voor de (instrument-)herhaalbaarheid mogelijk te streng voor situaties met lage concentraties zoals achter luchtwassers of andere luchtreinigingstechnieken. Nu wordt op dat punt niet voldaan waar een absoluut minimum voor het criterium of een andere beoordelingswijze wellicht passend zijn.

6.3 Veldtests op de vier varkensbedrijven

De acht A500/DOL 51 sensoren werden na een ruime opstartperiode gedurende een jaar gevolgd met standaard referentiemetingen die ongeveer om de twee maanden plaatsvonden. In de aanloop werden praktische zaken zoals plek en wijze van installatie geregeld en logging van de sensoren via de luchtwassers gerealiseerd. Toch kon dit op twee locaties data-uitval niet geheel voorkomen, waardoor de dataset 17 dataparen voor en 17 dataparen na de luchtwassers bevatte in plaats van de minimaal gewenste 20. Door het niet toe kunnen passen van een veldkalibratie verviel nog een datapaar en daarmee tevens een bedrijf (locatie 3). Het bleek echter mogelijk de data van voor en na de luchtwassers te combineren in één regressielijn, die dus op 32 dataparen gebaseerd kon worden.

In de datasets met sensor- en referentiemetingen werden geen outliers geconstateerd. Vervolgens werden lineaire regressies uitgevoerd aan de hand van de ruwe (fabrieksgekaliibreerde), labgekalibreerde en veldgekalibreerde data. Bij het laatste werd zowel een generieke correctiefunctie gebaseerd op alle dataparen, als locatie-/sensorspecifieke correctiefuncties op basis van de waarnemingen aan de sensor in kwestie toegepast. Analyses werden uitgevoerd voor zowel de ingaande luchtstroom, uitgaande luchtstroom, als combinatie van beide luchtstromen. Het bleek mogelijk een generieke correctiefunctie toe te passen

gebaseerd op de gepoolde data van ingaande en uitgaande luchtstroom ($Y = 0,706x - 0,02$). De aldus gecorrigeerde sensordata vertoont een relatie met de standaard referentiemethode die (beschreven met een correlatiecoëfficiënt, helling en afsnijpunt uit orthogonale regressie) voldoet aan de criteria die het Richtlijnen rapport in deel D daaraan stelt.

6.4 Generieke of sensor-specifieke correctie

Het feit dat de sensorwaarden afdoende gecorrigeerd konden worden met één generieke correctiefunctie is een belangrijke constatering voor toepassing bij doelvoorschriftvergunningen. Dit betekent dat er niet per veehouderij, of zelfs per sensor binnen een veehouderij, een veldkalibratie (en op basis daarvan een correctie) hoeft te worden uitgevoerd. Een veldkalibratie per sensor betekent concreet het uitvoeren van zes metingen met de SRM, gelijktijdig en op hetzelfde meetpunt. Dit is praktisch en financieel waarschijnlijk niet haalbaar binnen het kader van een veehouderijbedrijf met een doelvoorschriftvergunning. Dat is anders wanneer een sensor wordt ingezet voor continue metingen met als doel het bepalen van een emissiewaarde of emissiereductiepercentage voor een algemene erkenning. In het eerste geval schrijft deel A van het Richtlijnen rapport al voor dat er (indien mogelijk) continu wordt gemeten én er zes metingen met de SRM worden uitgevoerd om een sensorspecifieke veldkalibratie te kunnen uitvoeren.

Om de instrumentherhaalbaarheid vast te stellen werden sensoren na afloop van het project samengebracht op locatie 1. De sensoren in de ingaande luchtstroom voldeden daarbij aan de vereisten uit het Richtlijnen rapport. De sensoren in de uitgaande luchtstroom overschreden echter het criterium, omdat ze aan het einde van hun levensduur waren gekomen.

6.5 Labtests uitgangscontrolle (na afloop van inzet in het veld)

Bij de uitgangscontrolle bleken van de vier sensoren in de uitgaande luchtstroom één een defect sensorelement te hebben (afkomstig van locatie 2); deze produceerde in het geheel geen bruikbare data meer. Twee anderen vertoonden een inconsistent beeld, net als de de sensor van locatie 2 na manipulatie. Eén sensor functioneerde nog naar behoren. Dit duidt erop dat de sensoren achter de luchtwassers een levensduur van circa anderhalf jaar hebben en dan vrij abrupt stoppen (goed) te functioneren. In hoeverre sensoren weer correct werken na vervanging van het sensorelement zal uit de daaropvolgende ingangscontrolle moeten blijken.

Vergeleken met de fabrieksopgave wordt met maximaal ca. 0,5 ppm een beduidend lagere onzekerheid dan $\pm 1,5$ ppm of 10% van de meting gevonden. Hierbij moet aangetekend worden dat niet alle mogelijke bronnen van onzekerheid zijn meegenomen en omstandigheden in industriële toepassingen een stuk extremer kunnen zijn. Gegeven de verschillen in hellingen uit de labkalibraties van de ingangscontrolle en de uitgangscontrolle wordt de verwachte lange termijn drift van minder dan 10% niet gehaald. Onduidelijk is echter welke tijdsduur hieronder verstaan moet worden en door het toepassen van de veldkalibratie (welke over tijd opgebouwd wordt) wordt deze drift ondervangen. Momenteel wordt dit aspect nader onderzocht aan de hand van een meta-analyse van de onderzoeksdata die in de afgelopen jaren is verzameld. De responstijden slotte is niet direct vergelijkbaar, daar fabrikant de t_{50} rapporteert en het Richtlijnen rapport de t_{90} hanteert.

7 Conclusies en aanbevelingen

De belangrijkste resultaten en daaruit getrokken conclusies van dit onderzoek naar de Dräger Polytron® A500 met FL sensorelement/DOL 51 zijn:

- de sensor voldoet aan de criteria voor de prestatiekenmerken uit de labtests. De waarden van de prestatiekenmerken van de acht geteste sensoren bedroegen:
 - responstijd (t_{90}): 1-4 minuten;
 - herhaalbaarheid: 0,08-0,20 ppm;
 - instrumentherhaalbaarheid: 1,0 ppm;
 - detectielimiet: $\sim 0,03$ ppm;
 - meetonzekerheid door lack-of-fit $u_{(lof)}$: 0,07-0,13 ppm;
 - uitgebreide meetonzekerheid: 0,14-0,34 ppm;
- zoals geleverd af fabriek (na fabriekskalibratie) overschat de sensor de waarden van de standaard referentiemethode (SRM) in de veldtest bij vier varkensbedrijven met ongeveer 29%. Toepassing van een correctiefactor op basis van een labkalibratie met ijkgas uit een cilinder verkleint deze overschatting tot ongeveer 22%, maar dus niet voldoende. Toepassing van een correctiefunctie op basis van de veldkalibratie aan de SRM herstelt de overschatting volledig (helling van ongeveer één en een afsnijpunt van ongeveer nul). Correctie van gemeten waarden op basis van een veldkalibratie aan de SRM is noodzakelijk om accurate sensorwaarden te verkrijgen. Een generieke correctiefunctie (op basis van de groep van sensoren bij vier varkensbedrijven) presteert vergelijkbaar als sensor-/locatiespecifieke correctiefuncties;
- de generieke correctiefunctie uit de veldkalibratie in dit onderzoek is:
 $Y = 0,706x - 0,02$ met Y als gecorrigeerde waarde en x als sensorwaarde. Deze correctiefunctie moet worden toegepast op de ruwe waarnemingen van de sensor, zoals geleverd af fabriek.
- van de vier sensoren die in de uitgaande lucht van de vier luchtwassers waren ingezet (gedurende 379 tot 556 dagen) bleken er bij de labtests na de veldvalidatie één defect, twee inconsistente resultaten te produceren, en één nog correct functionerend. Hieruit wordt geconcludeerd dat het sensorelement voldoende vroegtijdig moet worden vervangen, bijvoorbeeld jaarlijks.

Geconcludeerd wordt dat de Dräger Polytron® A500 met FL sensorelement/DOL 51 op basis van de nu beschikbare gegevens voorwaardelijk voldoet aan deel D van het Richtlijnen rapport (Werkgroep richtlijnen emissies veehouderij, 2024) en daarmee geschikt is voor continue emissie monitoring in zowel de ingaande als uitgaande luchtstroom van luchtwassers bij varkensstallen. Tevens wordt de sensor geschikt geacht voor het (continu) meten van ammoniakconcentraties ten behoeve van het bepalen van emissies uit het diervverblijf, zelfs als het gaat om lage concentraties zoals bij jonge dieren of bij toepassing van bronmaatregelen.

De voorwaardelijkheid in het voldoen aan deel D van het Richtlijnen rapport heeft betrekking op de noodzaak tot het toepassen van een correctiefunctie op basis van een veldkalibratie aan de SRM. In de onderhavige studie is deze correctiefunctie vastgesteld voor varkens. Daarnaast is het advies sensorelementen van sensoren geplaatst na de wasser eerder preventief te vervangen, namelijk jaarlijks.

De resultaten en conclusies daaruit zijn geldig voor varkens en niet (zonder meer) voor andere diercategorieën of andere sectoren (zoals industrie).

Onderhavig rapport is voor zover bekend bij de auteurs de eerste openbaar gepubliceerde validatie van de Dräger Polytron® A500 met FL sensorelement/DOL 51 voor het meten van ammoniakconcentraties in de veehouderij. Ten tijde van het verschijnen van dit rapport is de sensor ook nog onderdeel van het verdiepende onderzoek op de sensoronderzoekslocaties voor melkkoeien, varkens en pluimvee. Dit onderzoek zal zich richten op het verder onderzoeken en mogelijk verklaren van de overschatting van de sensor en het vergroten van de levensduur van de sensor onder de omstandigheden van de uitgaande lucht van luchtwassers.

Bronnenlijst

- Groot Wassink, H., E. Maasdam, R. Mumm, D. Waty Pasaribu, en J. van Rooijen. 2025. Goed benutten van biologische combi-wassers; Onderzoek naar maatregelen aan biologische combi-luchtwassers om het verwijderingsrendement voor ammoniak en geur te verbeteren. Openbaar Rapport 1545. Wageningen: Wageningen Livestock Research. <https://doi.org/10.18174/686559>
- Mosquera, J., J.P.M. Ploegaert, en G.C.C. Kupers. 2019. Determination of ammonia concentrations in air from livestock housing systems; Reference method using gas washing as applied by Wageningen Livestock Research. Report 1187. Wageningen: Wageningen Livestock Research. <https://doi.org/10.18174/500006>
- Werkgroep richtlijnen emissies veehouderij. 2024. Richtlijnen voor het bepalen van emissies uit veestallen (versie 2); Guidelines for determination of emissions from livestock barns (version 2). Openbaar Rapport 1525. Wageningen: Wageningen Livestock Research. <https://doi.org/10.18174/678752>

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.

