



---

# Inventarisatie van methaansensoren en validatie van de Axetris LGD Compact-A CH4 ten behoeve van continue emissie monitoring in de melkveehouderij

C.A. Schep, J. Vonk, T. Rikkers, H.J.C. van Dooren, N.W.M. Ogink

Rapport 1456



**WAGENINGEN**  
UNIVERSITY & RESEARCH

---



# Inventarisatie van methaansensoren en validatie van de Axetris LGD Compact-A CH4 ten behoeve van continue emissie monitoring in de melkveehouderij

C.A. Schep, J. Vonk, T. Rijkers, H.J.C. van Dooren, N.W.M. Ogink

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 'B1 Emissie reductie methaan veehouderij' (BO-43.10-002-005).

Wageningen Livestock Research  
Wageningen, december 2023

---

Rapport 1456

---

Schep, C.A., J. Vonk, T. Rijkers, H.J.C. van Dooren, N.W.M. Ogink, 2023. *Inventarisatie van methaansensoren en validatie van de Axetris LGD Compact-A CH4 ten behoeve van continue emissie monitoring in de melkveehouderij*. Wageningen Livestock Research, Openbaar Rapport 1456.

Samenvatting: Het aantonen van de effectiviteit van technische maatregelen die de methaanemissie uit melkveestallen reduceren vereist dat deze op praktijkniveau worden doorgemeten. Momenteel ontbreekt het echter aan sensoren die de concentratie van methaan in melkveestallen continu kunnen meten. In het project 'Ontwikkelen van een methaansensor ten behoeve van continue bedrijfsmonitoring' zijn eisen opgesteld waaraan een dergelijke sensor moet voldoen en is de beschikbaarheid daarvan bij marktpartijen geïnventariseerd. Hieruit kwam een drietal opties naar voren die middels verkennende metingen in laboratorium en praktijk met elkaar vergeleken zijn. Van deze drie is de Axetris LGD Compact-A CH4 gevalideerd volgens het ontwikkel- en validatieprotocol (Vonk et al. 2021). Uit dit onderzoek wordt geconcludeerd dat de Axetris LGD Compact-A CH4 sensor gelijkwaardig is aan de referentiemethode en daarmee zonder correctie kan worden toegepast binnen een concentratiebereik van 0-100 ppm. Aanbevolen wordt om deze sensoren de komende jaren met referentiemetingen te blijven volgen om drift als gevolg van veroudering op langere termijn te kunnen vaststellen. Tot die tijd wordt geadviseerd jaarlijks laboratoriummetingen uit te voeren.

Summary: Sensors for measurement of methane concentration in the range typical for dairy housing are not available yet. This project developed criteria for continuous monitoring of methane emissions from dairy housing and explored the market availability. Eventually the Axetris LGD Compact-A CH4 sensor was chosen for extensive lab and field validation tests. Four identical sensors of this type were subjected to the study. Based on the results it can be concluded that this type of sensor performs equally to the reference method and can be used for measurement of methane concentration in dairy housing without further restrictions or corrections whenever the concentration within the concentration limits of 0-100 ppm. It is recommended to follow up on this research by comparing the sensor results with reference measurements to check on possible drift as a result of sensor aging. In the meantime, it is recommended to calibrate the sensor in a laboratory yearly according to the available test and validation protocol.

Dit rapport is gratis te downloaden op <https://doi.org/10.18174/641807> of op [www.wur.nl/livestock-research](http://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, 2023

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 1456

---

# Inhoud

<b>Samenvatting</b>	<b>5</b>
<b>1 Inleiding</b>	<b>7</b>
1.1 Achtergrond en aanleiding	7
1.2 Doel	7
1.3 Gebruikte definitie voor het begrip sensor	8
1.4 Leeswijzer	8
<b>2 Overzicht en selectie van beschikbare methaansensoren</b>	<b>9</b>
2.1 Beschrijving meetprincipes	9
2.2 Programma van eisen	10
2.3 Marktverkenning	11
2.4 Materiaal en methoden verkennende lab- en praktijktest	12
2.5 Resultaten verkennende lab- en praktijktest	12
2.6 Discussie en conclusies verkennende lab- en praktijktest	15
<b>3 Validatie van de Axetris LGD Compact-A CH4 sensor volgens het ontwikkel- en validatieprotocol</b>	<b>16</b>
3.1 Materiaal en methoden	16
3.1.1 Meetopstelling	16
3.1.2 Axetris methaansensor	17
3.1.3 Standaard referentie methode	17
3.1.4 Laboratoriumtests	17
3.1.5 Validatie onder praktijkomstandigheden	19
3.1.6 Beoordeling validatie onder praktijkomstandigheden	19
3.2 Resultaten	21
3.2.1 Laboratoriumtesten	21
3.2.2 Praktijkvalidatie	24
3.3 Discussie en conclusies validatietraject	25
<b>4 Discussie, conclusies en aanbevelingen</b>	<b>26</b>
<b>Literatuur</b>	<b>28</b>
<b>Bijlage 1 Startliteratuur</b>	<b>29</b>
<b>Bijlage 2 Concentratieverloop tijdens praktijktest</b>	<b>30</b>
<b>Bijlage 3 Dataset van labmetingen</b>	<b>31</b>
<b>Bijlage 4 Dataset van AM-SRM metingen</b>	<b>32</b>



---

# Samenvatting

Bij landbouwkundige activiteiten, zoals het houden van vee, ontstaan zowel emissies van luchtverontreinigende stoffen (waaronder stikstofoxiden en ammoniak) als broeikasgassen. Vanuit de landbouw vooral in de vorm van methaan (CH<sub>4</sub>), lachgas (N<sub>2</sub>O) en kooldioxide (CO<sub>2</sub>). Het aantonen van de effectiviteit van technische maatregelen om gasvormige emissies te reduceren vereist dat deze op praktijkniveau worden doorgemeten. Uit eerdere metingen is gebleken dat de huidige apparatuur niet altijd in staat is de lage methaanconcentraties in melkveestallen met voldoende nauwkeurigheid te bepalen (Schip et al., 2022). Om tot een verbeterde continue meting van methaanconcentraties en daarmee -emissies te komen is het project 'Ontwikkelen van een methaansensor ten behoeve van continue bedrijfsmonitoring' gestart. In dit project is een sensor gedefinieerd als 'een meetsysteem waarmee gasconcentraties continu gemeten kunnen worden'. De doelen van dit project waren:

- het in kaart brengen van al beschikbare sensoren en/of potentiële interesse bij het bedrijfsleven voor het ontwikkelen ervan;
- het onderwerpen van geschikte systemen aan een verkennende laboratorium- en praktijktest;
- indien aan de criteria werd voldaan, het doorlopen van het ontwikkel- en validatieprotocol voor sensoren (Vonk et al., 2021) voor een volledige praktijkvalidatie van de sensor voor melkvee.

Uit literatuuronderzoek is gebleken dat de methaanconcentratie kan worden gemeten via vier meetprincipes: een metaaloxide-reactie, elektrochemisch, optisch en gaschromatografie. De metaaloxide en elektrochemische meetprincipes hebben als nadeel dat deze een hogere detectielimiet hebben en minder goed in staat zijn om te corrigeren voor kruisgevoeligheden. Uit een inventarisatie onder zestien bedrijven bleek dat de sensoren die voldeden aan het programma van eisen de optische meettechniek toepassen.

De inventarisatie onder 16 bedrijven resulteerde in twee verschillende sensoren die voldeden aan het programma van eisen: de ABB EL3020 met aangepast meetbereik 0-100ppm en de Axetris LGD Compact-A CH<sub>4</sub>. Deze twee kandidaten zijn, samen met een ABB EL3020 met meetbereik 0-500 ppm, onderworpen aan een verkennende lab- en praktijktest in de buitenlucht en in een melkvee-, geiten- en varkensstal. Tijdens de praktijktest zijn de sensoren vergeleken met de standaard referentiemethode (SRM).

In de labtest voldeed elk van de geteste sensoren aan de eisen van het ontwikkel- en validatieprotocol (Vonk et al., 2021). Tijdens de praktijktest presteerden de drie sensoren in de stallucht van melkvee, geiten en vleesvarkens naar behoren. In de buitenlucht presteerde de ABB (0-500 ppm) het best gevolgd door de Axetris LGD Compact-A CH<sub>4</sub>.

Vanwege de gunstige prijs/kwaliteit verhouding is een volledige validatie in melkveestallen volgens het ontwikkel- en validatieprotocol (Vonk et al., 2021) uitgevoerd voor de Axetris LGD Compact-A CH<sub>4</sub> in de periode van maart 2022 t/m juli 2023. De resultaten hiervan zijn weergegeven in Tabel 3.1 en Tabel 3.2. Daaruit bleek dat dit sensortype voldoet aan de gestelde criteria in het ontwikkel- en validatieprotocol (Vonk et al., 2021). De Axetris LGD Compact-A CH<sub>4</sub> is, in de configuratie zoals toegepast in dit onderzoek, op dit moment geschikt om methaanconcentraties te meten in melkveestallen binnen een concentratiebereik van 0-100 ppm. Met het meten van de methaanconcentratie kan echter de emissie van methaan niet direct bepaald kan worden. Voor een emissiebepaling is het van belang om een representatief luchtmonster te bemeten van zowel de ingaande als de uitgaande lucht van een stal. De representativiteit van een luchtmonster hangt in de praktijk af van de stalconfiguratie en luchtstroming. Dit zal verder onderzocht moeten worden. De Axetris LGD Compact-A CH<sub>4</sub> is niet gevalideerd voor het meten van de ingaande stallucht.

Aanbevolen wordt: a) om de Axetris LGD Compact-A CH<sub>4</sub> ook te valideren in de stallucht en gassenmatrix van andere diercategorieën en in de buitenlucht, b) om levensduur en drift te bepalen door deze sensor in de komende jaren te blijven vergelijken met de referentiemethode en c) om voor de ABB (0-500ppm) het validatietraject eveneens te doorlopen.





---

# 1 Inleiding

## 1.1 Achtergrond en aanleiding

Bij landbouwkundige activiteiten, zoals het houden van vee, ontstaan zowel emissies van luchtverontreinigende stoffen (waaronder stikstofoxiden en ammoniak) als broeikasgassen. Vanuit de landbouw vooral in de vorm van methaan (CH<sub>4</sub>), lachgas (N<sub>2</sub>O) en kooldioxide (CO<sub>2</sub>)<sup>1</sup>.

In 2021 was de landbouwsector verantwoordelijk voor 18,0 Mton CO<sub>2</sub>-eq aan broeikasgasuitstoot, 10,5% van het nationaal totaal (Van der Net et al., 2023). Het grootste deel hiervan bestaat uit CH<sub>4</sub> (13,0 Mton CO<sub>2</sub>-eq), waarbij rundvee in totaal 10,3 Mton CO<sub>2</sub>-eq bijdraagt<sup>2</sup>. Binnen het klimaatakkoord uit 2019 (zie [www.klimaatakkoord.nl](http://www.klimaatakkoord.nl)) is afgesproken dat in 2030 de broeikasgasemissies uit de landbouw met 3,5 Mton CO<sub>2</sub>-eq zijn gereduceerd. De veehouderij moet daaraan bijdragen met een reductie van ten minste 1 Mton CO<sub>2</sub>-eq in de vorm van methaan. Uiteindelijk doel is dat de sectoren landbouw en landgebruik tezamen in 2050 klimaatneutraal zijn. In het programma 'Integraal Aanpakken' ([www.integraalaanpakken.nl](http://www.integraalaanpakken.nl)) wordt door onderzoek, sectoren en overheid samengewerkt om met technische en management maatregelen de methaanemissies te reduceren en daarmee een bijdrage te leveren aan de reductiedoelstellingen.

Het aantonen van de effectiviteit van technische maatregelen die de methaanemissie reduceren, vereist dat deze op praktijkniveau worden doorgemeten. Een systeem voor continue bedrijfsmonitoring kan daarbij behulpzaam zijn. Continue monitoring, naast de inzet van referentie-methoden, geeft voor onderzoek het belangrijke voordeel dat relaties tussen omgevingsfactoren en emissies beter kunnen worden onderzocht. Binnen het programma 'integraal aanpakken' wordt gewerkt met sensoren die de concentratie in de stal- en buitenlucht meten. Eén van deze projecten is het Netwerk Praktijkbedrijven (<https://www.netwerkpraktijkbedrijven.nl/>). In dit project worden op 15 melkveebedrijven de emissies van methaan en ammoniak continu gemeten om op basis daarvan de bedrijfsvoering te optimaliseren. Ondanks dat melkvee de grootste bijdrage levert aan methaanemissies, zijn de gemeten concentraties doorgaans laag vanwege het hoge ventilatieniveau. Er is dan ook gebleken, dat de huidige apparatuur niet altijd in staat is deze met voldoende nauwkeurigheid te meten (Schep et al., 2022). Om tot een verbeterde continue bepaling van methaanconcentraties en daarmee -emissies te komen, is in 2020 het project 'Ontwikkelen van een methaansensor ten behoeve van continue bedrijfsmonitoring' gestart.

## 1.2 Doel

De doelen van dit project zijn:

- het in kaart brengen van al beschikbare meetsystemen voor het meten van methaanconcentraties en/of potentiële interesse bij het bedrijfsleven voor het ontwikkelen ervan;
- het onderwerpen van geschikte systemen aan een verkennende laboratorium- en praktijktest;
- indien aan de criteria voldaan wordt, het verder testen van deze meetsystemen onder praktijkomstandigheden. Hiermee wordt beoogd uiteindelijk tot een volledige praktijkvalidatie volgens het Ontwikkel- en validatieprotocol voor sensoren (Vonk et al., 2021) te komen.

---

<sup>1</sup> Het gaat hierbij in de internationale rapportagesystematiek om de zogenaamde procesemissies, waardoor CO<sub>2</sub>-emissies van energieverbruik in een andere sector vallen. Daarnaast blijft de CO<sub>2</sub>-productie door dieren buiten beschouwing, daar dit onderdeel is van de korte kringloop. Onder de sector landbouw gerapporteerde CO<sub>2</sub> betreft om die reden alleen de emissies door het gebruik van kalkmeststoffen.

<sup>2</sup> Verder op te splitsen in 8,1 Mton CO<sub>2</sub>-eq door pens- en darmfermentatie, en 2,2 Mton CO<sub>2</sub>-eq uit mest (stallen, opslagen en mestbe- en -verwerking). In deze getallen is ook een klein aandeel van vleesvee inbegrepen.

---

## 1.3 Gebruikte definitie voor het begrip sensor

De definitie van sensor is niet altijd duidelijk en eenduidig. In een heel brede definitie is een sensor een apparaat, module of machine die (een verandering van) een fysische of chemische eigenschap van de omgeving waarneemt en deze informatie in de vorm van een elektrisch signaal doorgeeft voor verdere verwerking. In Vonk et al. (2021) wordt een sensor omschreven als een meetsysteem waarmee gasconcentraties continu gemeten kunnen worden, onafhankelijk van het meetprincipe, de grootte of het prijsniveau. Deze laatste definitie is ook uitgangspunt voor dit rapport met de aanvulling dat in de doelstelling van dit project de eis is opgenomen om een sensor te selecteren en valideren met een zo goed mogelijke prijs-kwaliteit verhouding. Of in andere woorden: welke tegen de laagste prijs beschikbare sensor voldoet aan de eisen die het ontwikkel- en validatieprotocol aan de prestatiekenmerken stelt.

## 1.4 Leeswijzer

Dit rapport geeft een beknopte weerslag van het selectieproces en, in meer detail, de validatie van de uiteindelijk geselecteerde sensor (Axetris LGD Compact-A CH4). Hoofdstuk 2 bevat de resultaten van het literatuuronderzoek en het verkennende onderzoek. Daarin worden de uitkomsten beschreven van de beschikbare meetprincipes, het programma van eisen voor de methaansensor, de resultaten van een marktverkenning en de opzet en resultaten van een verkennend onderzoek. Op basis daarvan is uiteindelijk de Axetris LGD Compact-A CH4 geselecteerd als potentieel geschikte methaansensor. In hoofdstuk 3 worden de resultaten van de validatie volgens het ontwikkel- en validatieprotocol beschreven. Hoofdstuk 4 sluit af met discussie, conclusies en aanbevelingen.

---

## 2 Overzicht en selectie van beschikbare methaansensoren

Met een literatuurstudie zijn mogelijke meetprincipes verkend en potentieel interessante methaansensoren geïdentificeerd. Bijlage 1 geeft een overzicht van de gevonden literatuur, waarbij geconstateerd werd dat principes doorgaans al bekend waren of nog in ontwikkeling zijn en daarmee nog niet marktrijp. In paragraaf 2.1 wordt een korte beschrijving van reeds beschikbare technieken gegeven.

Daarnaast werd een programma van eisen en een overzicht opgesteld van sensorleveranciers (paragrafen 2.2 en 2.3), die betreffende of soortgelijke producten in hun assortiment hebben. Met deze bedrijven werd contact opgenomen om na te gaan of er mogelijkheden bestonden of interesse was in (het ontwikkelen van) een sensorsysteem voor gebruik in de veehouderij. Potentieel geschikte sensoren werden daarna onderworpen aan een verkennende lab- en praktijktest. Opzet, uitkomsten en conclusies hiervan worden in paragraaf 2.4 tot en met 2.6 kort beschreven.

### 2.1 Beschrijving meetprincipes

Methaan is het hoofdbestanddeel van aardgas. Voor procesbewaking en veiligheid is er daarom bij productie, transport en gebruik van aardgas veel vraag naar, en dus aanbod van, sensoren om de methaanconcentratie te meten. Daarbij is relevant te vermelden dat de te bemeten methaanconcentratieniveaus in deze toepassingen aanzienlijk hoger liggen dan concentratieniveaus in stallen. De achterliggende meetprincipes waarop veel van deze sensoren zijn gebaseerd worden hierna kort geïntroduceerd, inclusief hun voor- en nadelen.

#### **Metaaloxide sensoren**

Metaaloxides zijn reactieproducten van een metaal met zuurstof. Sommige van deze metaaloxides worden in halfgeleiders toegepast. In deze sensoren wordt deze halfgeleider verhit, waardoor het te meten gas erop oxideert en de geleidbaarheid verandert. Dit vormt een maat voor de concentratie en door bij verschillende temperaturen te werken kan onderscheid gemaakt worden tussen gassen. Voordelen van deze technologie zijn de lange levensduur en zeer lage kosten. Nadelen zijn de hoge detectielimiet (vaak enkele ppm), kruisgevoeligheid voor andere gassen en voor vocht.

#### **Elektrochemische sensoren**

Deze sensoren bestaan uit een houder met een elektrolyt waarin in ieder geval een werk- en tegenelektrode zijn geplaatst, soms ook een referentie-elektrode<sup>3</sup>. Het te meten gas diffundeert door een membraam naar de werkelektrode waardoor een ionenstroom naar de tegenelektrode ontstaat. Uit de gemeten stroom volgt de concentratie die (indien aanwezig) met behulp van de referentie-elektrode wordt gecompenseerd voor de condities op dat moment. Voordeel is dat de sensor redelijk specifiek en gevoelig is voor het te meten gas tegen nog altijd beperkte kosten. Als nadelen kunnen echter de resterende kruisgevoeligheden, beperkte levensduur en afnemende gevoeligheid en/of drift over tijd genoemd worden.

#### **Optische sensoren**

Optische sensoren maken voor het meten van de concentratie van een gas gebruik van (een deel) van het elektromagnetische spectrum, meestal in het infrarood gebied. Er is een grote variatie in uitvoering en toepassingen. Hieronder worden een aantal daarvan die toegepast worden in sensoren verder toegelicht.

---

<sup>3</sup> In complexere sensoren soms ook twee, bijvoorbeeld als meerdere elektrolyten en/of afscheidingen toegepast worden.

---

### *Niet-dispersieve infrarood (NDIR) sensoren*

Hierbij wordt gebruik gemaakt van de eigenschap van gassen om een gedeelte van het elektromagnetische spectrum te absorberen van een lichtbron die door het gasmonster schijnt. Door een filter te gebruiken dat alleen licht met een bepaalde golflengte typerend voor het te meten gas doorlaat, of een bron die enkel deze golflengte produceert, kan aan de hand van de hierin gemeten lichtabsorptie de concentratie van het gas bepaald worden. Voordelen zijn de beperkte gevoeligheid voor temperatuur en vocht, naast de lange levensduur. Nadelen zijn de hogere prijs, de kruisgevoeligheid voor andere gassen als de absorptie golflengtes dicht bij elkaar liggen en noodzaak tot een regelmatige bepaling van de nulwaarde.

### *Foto-akoestische sensoren*

De moleculen van het te meten gas worden aangeslagen (geëxciteerd), meestal door middel van een infrarode lichtbron. Als ze terugvallen in hun oorspronkelijke status, wordt energie uitgezonden die kan worden omgezet in detecteerbaar geluid. Voordelen zijn de lage detectiegrens, hoge precisie en lage responstijd in vergelijking tot elektrochemische sensoren. Nadelen zijn de hogere prijs, gevoeligheid voor omgevingsgeluid en trillingen, kruisgevoeligheid en vocht.

### *Fourier Transform InfraRed (FTIR)*

Als infrarode straling door een luchtmonster gestuurd wordt, zal een deel geabsorbeerd worden door de aanwezige gassen. Omdat dit voor ieder molecuul bij andere golflengten gebeurt, ontstaat een spectrum dat verder geanalyseerd wordt door de bijbehorende software. Met FTIR kan zo ook van complexe luchtmengsels de samenstelling achterhaald worden. Dit maakt het tot een krachtig onderzoeksinstrument, maar nadelen zijn de hoge prijs en benodigd kennisniveau om afhankelijk van de meetomstandigheden de juiste instellingen te kiezen.

### *Quantum cascade laser (QCL)*

In deze techniek wordt in plaats van een specifieke infraroodbron een laser toegepast die meerdere golflengtes kan produceren in het midden en verre infrarood. Dat maakt dat sensoren met deze lasertechniek specifiekere gassen kunnen detecteren en bijna geen interferenties kent (ook niet voor water). Nadelen zijn de nog hogere prijs.

### **Gaschromatografie (GC)**

Het meten van methaan op een gaschromatograaf met vlamionisatiedetector (Flame Ionization Detector; FID) wordt gezien als de referentiemethode om methaan te meten. Daartoe wordt dan een luchtmonster gedurende 24 uur genomen met de longmethode. Hierbij wordt een lege monsternamenzak in een gesloten vat geplaatst, waar lucht uit gezogen wordt zodat de zak zich gaandeweg vult. Vervolgens wordt het monster naar het lab gebracht en geanalyseerd, wat het naast de meest specifieke ook een arbeidsintensieve en dus kostbare methode maakt met bovendien lage tijdsresolutie. Deze methode is verder in detail beschreven door Mosquera et al. (2020) en wordt in dit rapport gebruikt als referentiemethode.

## 2.2 Programma van eisen

Voorafgaand aan het literatuuronderzoek en de marktverkenning is een programma van eisen opgesteld waaraan een potentieel geschikte sensor voor meting van methaanconcentraties in de (melk-)veehouderij moet voldoen. De eisen zijn gericht op een meting met een hoge nauwkeurigheid in een concentratiebereik dat typerend is voor een melkveestal. Deze kenmerken zijn gebaseerd op Vonk et al. (2021). De eisen zijn in een expert-overleg opgesteld. Tabel 2.1 vat de belangrijkste kenmerken samen.

**Tabel 2.1** Criteria voor methaansensor gericht op melkveestallen.

Eigenschap	Waarde	Opmerking
Kosten	< € 5.000	Wens, geen harde eis
Meetbereik	6-57 ppm	Vonk et al. (2021)
Resolutie	< 1 ppm	
Meetomstandigheden	Geschikt voor 69-100% RV	Vonk et al. (2021)
Drift	< 1 ppb/24h	
Interferentie	Niet voor C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> , CO <sub>2</sub> en H <sub>2</sub> O	Of correctie daarvoor
Responstijd	< 15 min.	Vonk et al. (2021)
Herhaalbaarheid op detectielimiet	< 10%	Vonk et al. (2021)
Herhaalbaarheid op span	< 5%	Vonk et al. (2021)
Nauwkeurigheid	< 8% van span	
Interferenties	Zie Vonk et al. (2021)	Afhankelijk van meetprincipe

## 2.3 Marktverkenning

Uit het literatuuronderzoek, netwerkcontacten en een inventarisatie op internet is een lijst van fabrikanten en/of leveranciers van potentieel geschikte methaansensoren opgesteld. Deze lijst bevatte 16 firma's. Sommige fabrikanten leveren alleen OEM<sup>4</sup>-versies van hun producten die door andere fabrikanten of leveranciers tot een eindproduct worden samengesteld. Van deze lijst zijn 12 bedrijven benaderd met een (Engelstalige) mail.

**Tabel 2.2** Overzicht van mogelijke leveranciers voor methaansensoren volgens programma van eisen.

Bedrijfsnaam	Website
EMS	<a href="https://www.macview.eu">https://www.macview.eu</a>
imec	<a href="https://www.imec-int.com">https://www.imec-int.com</a>
Siemens	<a href="https://www.siemens.com">https://www.siemens.com</a>
ABB	<a href="https://www.abb.com">https://www.abb.com</a>
Dräger	<a href="https://www.draeger.com">https://www.draeger.com</a>
Ravebo	<a href="https://www.ravebo.nl">https://www.ravebo.nl</a>
Figaro	<a href="https://www.figarosensor.com">https://www.figarosensor.com</a>
LSE	<a href="http://www.lsemonitors.nl">http://www.lsemonitors.nl</a>
Envicontrol	<a href="https://www.envicontrol.com">https://www.envicontrol.com</a>
Catec	<a href="https://www.catec.nl">https://www.catec.nl</a>
Edinburgh Instruments	<a href="https://edinburghsensors.com">https://edinburghsensors.com</a>
NOVASIS	<a href="http://www.novasis-innovazione.it">http://www.novasis-innovazione.it</a>
Carltech	<a href="http://www.carltech.nl">http://www.carltech.nl</a>
MSA	<a href="https://www.msasafety.com">https://www.msasafety.com</a>
Axetris	<a href="https://www.axetris.com">https://www.axetris.com</a>
Multi-Instruments	<a href="https://multi-instruments.nl">https://multi-instruments.nl</a>

De meeste bedrijven gaven aan niet over de juiste uitvoering te beschikken (hoge meetranges vaak met weergave in volumeprocent) of konden niet aan het programma van eisen voldoen. EMS gaf aan een dergelijke sensor te willen ontwikkelen maar kon deze niet tijdig voor het vervolgonderzoek aanleveren. ABB bood een verbeterde versie aan van de bij WLR in gebruik zijnde toestellen en Axetris een OEM<sup>4</sup>-oplossing. Beide aangeboden typen sensoren werden eerst onderworpen aan een verkennende lab- en praktijktest.

<sup>4</sup> OEM staat voor Original Equipment Manufacturer. Dit zijn toeleverende bedrijven waarvan de producten al dan niet als groter geheel en onder andere namen verkocht kunnen worden.

## 2.4 Materiaal en methoden verkennende lab- en praktijktest

Het verkennend onderzoek werd uitgevoerd met twee ABB EL3020 monitoren met Uras26 infrarood fotometrische meetcellen. Eén daarvan betrof de huidige uitvoering (meetbereik 0-500 ppm) en de ander een verbeterde versie (meetbereik 0-100 ppm). Een Axetris LGD Compact-A CH4 module werd ten behoeve van het verkennend onderzoek bij Axetris aangeschaft en door de technische werkplaats van de WUR tezamen met een pomp (Thomas 1420VDP BLDC) ingebouwd in een beschermende behuizing.

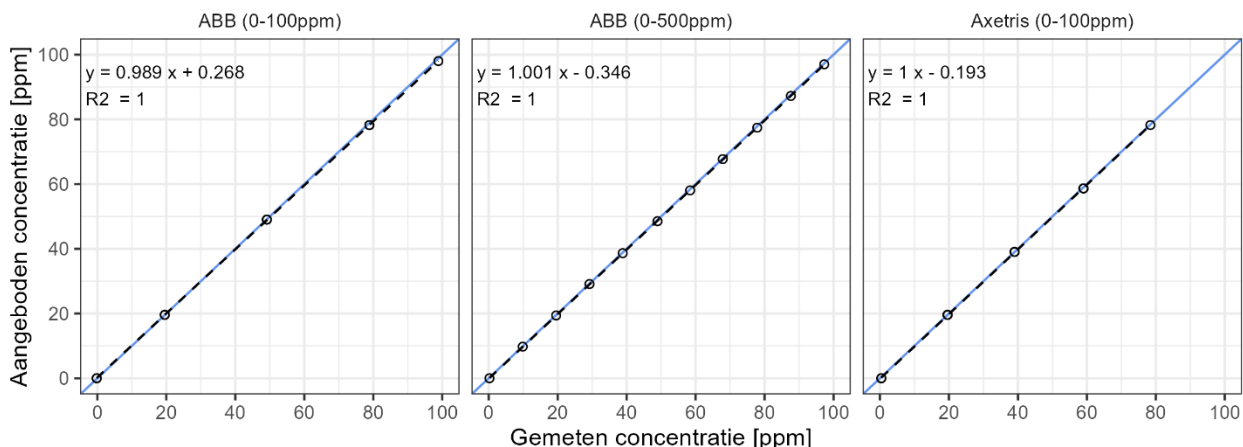
De toestellen zijn in het laboratorium getest volgens een kalibratieprocedure waarbij stikstofgas (Scott Specialty Gases 99,999 vol% N<sub>2</sub>; Breda, Nederland) gemengd is met 98 ppm methaangas (Scott Specialty Gases; nauwkeurigheid ± 1%; Breda, Nederland) om de gewenste concentraties te bereiken. Voor de ABB met meetbereik 0-500 ppm de kalibratielijns van februari 2019 gebruikt. Mogelijk was deze kalibratielijns niet meer geschikt bij aanvang van de praktijktest waardoor afwijkingen tussen sensor en referentie niet te wijten zijn aan het apparaat, maar aan de verouderde kalibratielijns.

Na de labkalibratie zijn de sensoren gedurende periodes van ca. vier weken ingezet onder praktijkomstandigheden, achtereenvolgens bij melkvee, geiten, varkens en in de buitenlucht. Aan het begin en eind van elke periode is een referentiemeting uitgevoerd (longmethode gevolgd door analyse met GC, zie paragraaf 2.1) om de sensoren te vergelijken met de referentiemethode volgens Mosquera et al. (2020). Na afloop is in november 2021 opnieuw een kalibratieprocedure in het lab uitgevoerd op de toestellen.

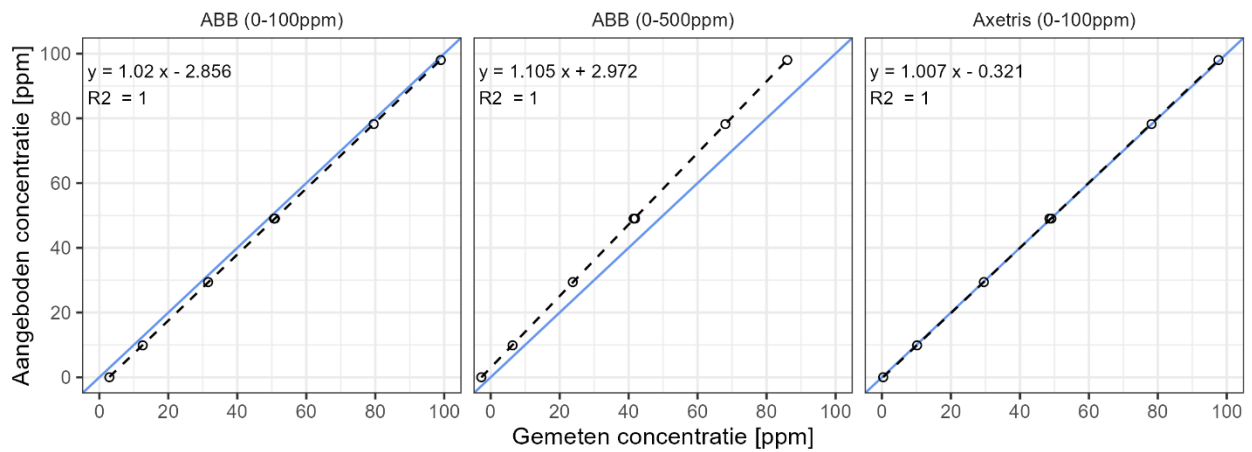
## 2.5 Resultaten verkennende lab- en praktijktest

De resultaten van de kalibratieprocedure voorafgaand aan de praktijktest zijn weergegeven in Figuur 2.1. Uit deze figuur blijkt dat elk van de gebruikte sensoren in staat is om onder labcondities met een goede nauwkeurigheid methaanconcentraties te meten in het bereik van 0-100 ppm.

De resultaten van de kalibratieprocedure na de praktijktest zijn weergegeven in Figuur 2.2. Uit deze figuur blijkt dat de richtingscoëfficiënt van de kalibratielijns 2% en 10,5% afwijkt van de initiële kalibratielijns voor respectievelijk ABB (0-100ppm) en ABB (0-500ppm). Hierbij moet echter wel in acht worden genomen dat de initiële kalibratielijns van ABB (0-500ppm) in februari 2019 bepaald is waardoor het verloop niet enkel toe te kennen is aan de uitgevoerde praktijktest.

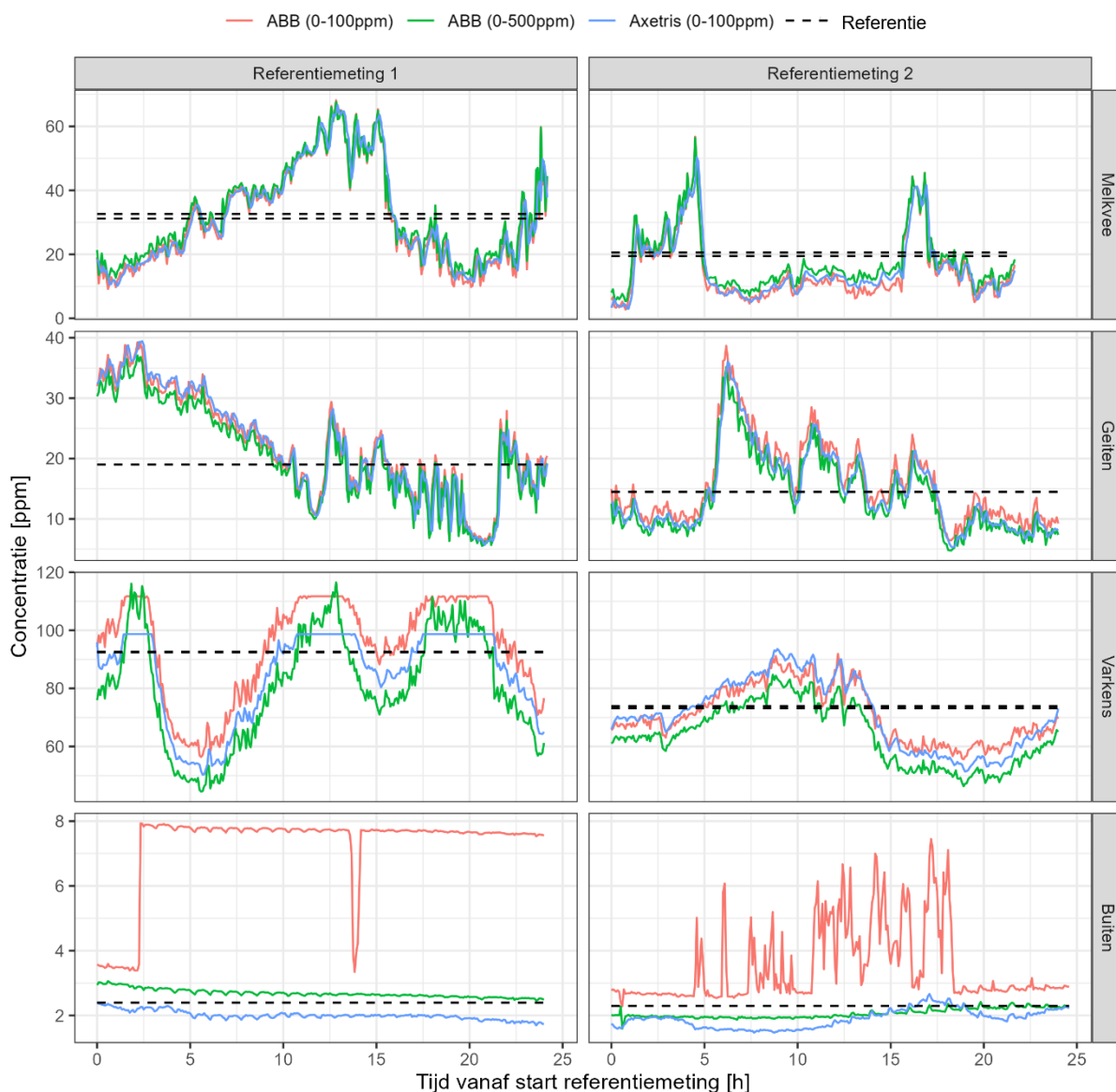


**Figuur 2.1** Resultaten van de kalibratieprocedure voorafgaand aan de praktijktest; uitgevoerd in juni 2021 voor ABB (0-100ppm) en Axetris (0-100ppm) en in februari 2019 voor ABB (0-500ppm) tussen 0 en 100 ppm.



**Figuur 2.2** Resultaten van de kalibratieprocedure na de praktijktest; uitgevoerd in november 2021 tussen 0 en 100 ppm.

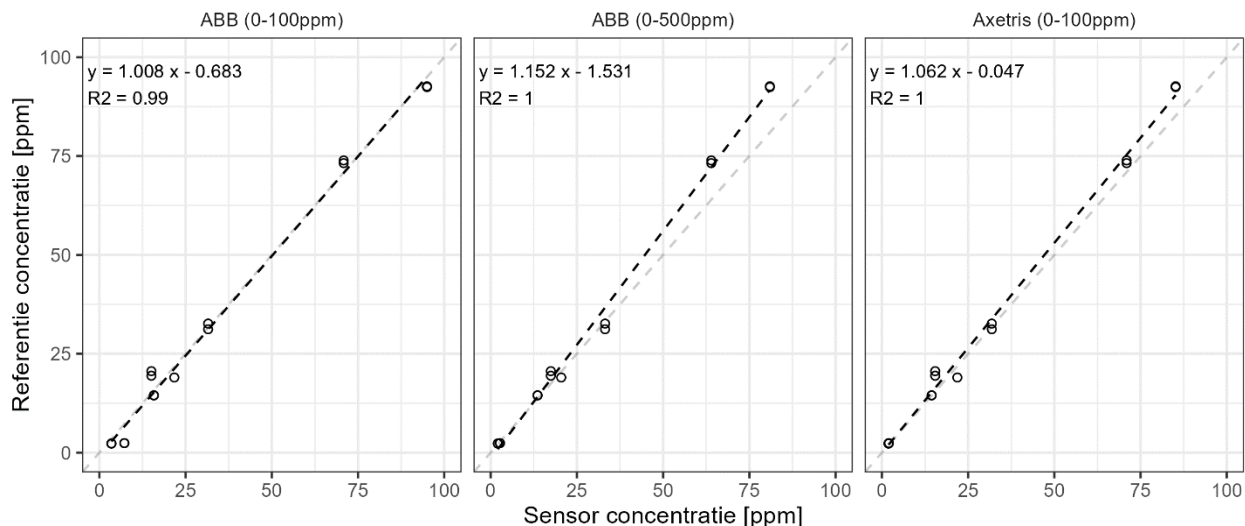
De sensorconcentraties van de verschillende toestellen gedurende twee 24-uurs referentiemeting bij melkvee, geiten, vleesvarkens en in de buitenlucht zijn weergegeven in Figuur 2.3. De sensoren laten een identiek concentratiepatroon zien bij melkvee en geiten. Tijdens de eerste referentiemeting bij varkens lagen de methaanconcentraties boven de span (bovengrens meetbereik) van 100 ppm voor de ABB (0-100ppm) en de Axetris (0-100ppm). Daarom is enkele dagen na de eerste referentiemeting verdunning van de monsterlucht met buitenlucht toegepast. Ondanks de specificaties bleek de ABB (0-100ppm) tot 110 ppm te kunnen meten. Aangenomen is dat de opgestelde kalibratielijnen van toepassing was op de gemeten waarden tot 120 ppm. Tijdens de meting in de buitenlucht lieten de ABB (0-100ppm) artefacten zien waarvan de reden niet opgehelderd kon worden.



**Figuur 2.3** Concentraties gemeten gedurende de verkennende praktijktest tijdens twee referentiemetingen gerangschikt naar niveau, in een melkveestal, geitenstal, vleesvarkensstal en in de buitenlucht. Bij de vleesvarkens is na enkele dagen verdund met buitenlucht vanwege overschrijding van het meetbereik. De stippellijnen in de grafieken geven de concentratie weer zoals gemeten met de referentiemethode.

In Figuur 2.4 is de gemiddelde sensorrespons tijdens de referentiemetingen uitgezet tegen de referentiewaarde waarbij een lineaire regressielijn is opgesteld. De ABB-monitor met meetbereik 0-500 ppm laat de grootste afwijking van de 1:1 lijn zien. Deze afwijking is wel in lijn met de kalibratielijn zoals opgesteld na de praktijktest (Figuur 2.2).





**Figuur 2.4** Gemiddelde sensorrespons incl. correctie op basis van labkalibratie vs. gemeten concentratie volgens de referentiemethode in duplo voor ABB (0-100ppm), ABB (0-500ppm) en Axetris (0-100ppm) tijdens de praktijktest in een melkveestal, geitenstal, vleesvarkensstal en in de buitenlucht.

## 2.6 Discussie en conclusies verkennende lab- en praktijktest

Uit het literatuuronderzoek en de marktverkenning is gebleken dat er momenteel nog maar weinig betaalbare opties zijn in het meetbereik van 0-100 ppm ten behoeve van het continu monitoren van methaanconcentraties. Er konden uiteindelijk twee systemen getest worden: de ABB EL3020 met Uras26 meetcel in verlaagd meetbereik van 0-100 ppm en de Axetris LGD Compact-A CH4. Deze twee systemen zijn samen met een ABB EL3020 met meetbereik 0-500 ppm die voor ander onderzoek wordt ingezet, getest in het lab en in de praktijk vergeleken met referentiemetingen.

In een labtest voldeden beide sensoren evenals de EL3020 met meetbereik 0-500 ppm aan de eisen van het ontwikkel- en validatieprotocol (Vonk et al., 2021). Wel bleek de ABB met meetbereik 0-500 ppm na afloop van de praktijktest verlopen te zijn ten opzichte van de kalibratielijn zoals bepaald in februari 2019. Dit hoeft echter niet te betekenen dat deze afwijking tijdens de praktijktest is opgetreden. De afwijking is mogelijk het gevolg van de schok-/trillingsgevoeligheid van het meetprincipe. Na correctie presteerden alle toestellen tijdens de praktijktest in de stallucht van melkvee, geiten en vleesvarkens naar behoren.

Gezien de lagere prijs, de robuustheid van het meetprincipe en de goede prestaties tijdens de praktijktest, is besloten drie extra Axetris LGD Compact-A CH4 sensoren aan te schaffen zodat een volledige validatie bij melkvee ondernomen kon worden (hoofdstuk 3). Aanbevolen wordt om ook voor de ABB (0-500ppm) een validatietraject te doorlopen.

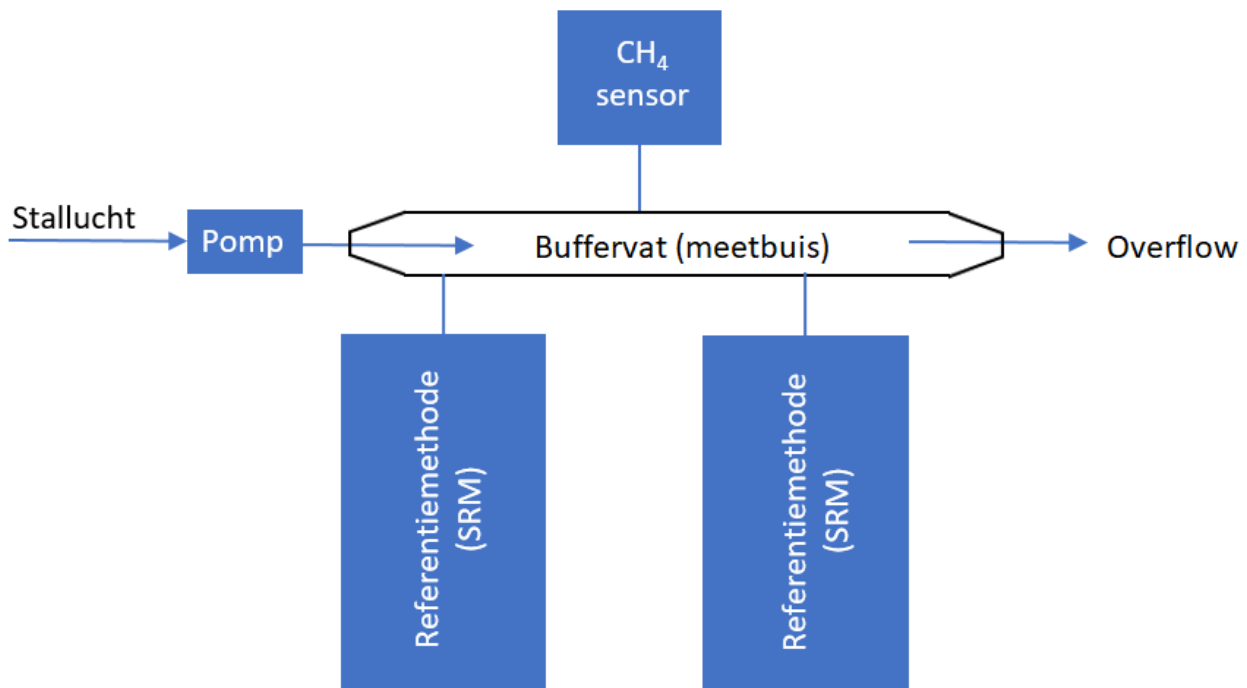
# 3 Validatie van de Axetris LGD Compact-A CH<sub>4</sub> sensor volgens het ontwikkel- en validatieprotocol

De Axetris LGD Compact-A CH<sub>4</sub> (verder: Axetris) methaansensor is gevalideerd volgens het ontwikkel- en validatieprotocol zoals opgesteld door Vonk et al. (2021). Hiervoor zijn vier exemplaren van de sensor aangeschaft. In maart 2022 zijn de testen in het laboratorium uitgevoerd met aansluitend de validatie onder praktijkomstandigheden in de periode van maart 2022 tot en met juli 2023.

## 3.1 Materiaal en methoden

### 3.1.1 Meetopstelling

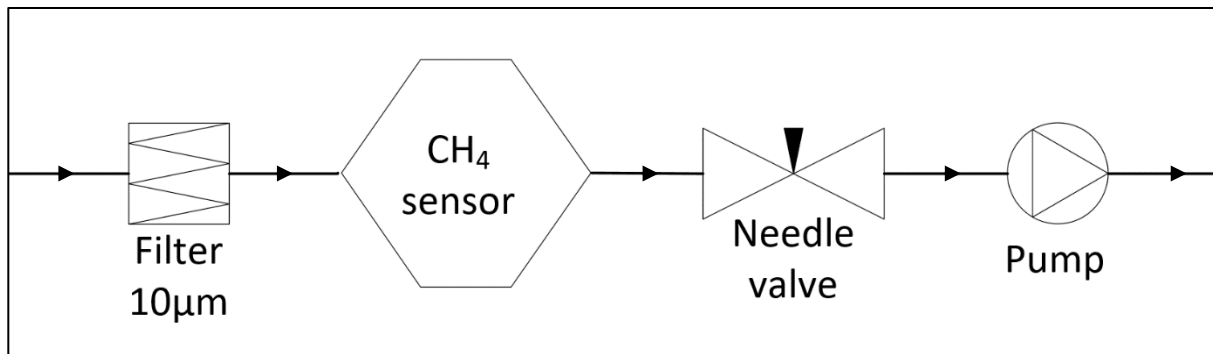
Figuur 3.1 geeft een schematisch overzicht van de meetopstelling die is gebruikt tijdens de validatie onder praktijkomstandigheden. In de stal wordt op ca. 2 meter onder de nok om de tien meter stallengte een luchtmonster aangezogen door een meetleiding van PE met kritische capillairen voorzien van een 30 µm filter. Het luchtmonster wordt via een pomp (KNF N840.1.2.FT.18 maximum flow 34 L/min) aangezogen en via een buffervat of meetbuis aangeboden aan de Axetris-methaansensor (Alternatieve Methode; AM) en de Standaard Referentie Methode (SRM). Zowel de AM als de SRM zuigen actief lucht aan uit het buffervat.



**Figuur 3.1** Gebruikte meetopstelling tijdens de validatie onder praktijkomstandigheden.

### 3.1.2 Axetris methaansensor

De gebruikte methaansensoren zijn samengesteld uit het eigenlijke meetelement (Axetris LGD compact-A CH<sub>4</sub>) en een pomp (Thomas Diaphragm pump 1420VDP BLDC – 12V; max capaciteit 7,4 l/min) om de lucht door de sensor te leiden. Deze elementen zijn samengevoegd in een gasdichte behuizing. Een technische tekening van de assemblage is opgenomen in Figuur 3.2. De flow van de pomp is beperkt door een speed control unit en de flow is met behulp van een naaldklep afgesteld op een flow van 400 ml/min. Om drukverschillen in de sensor te voorkomen zijn de naaldklep en pomp na de sensor geplaatst. De pomp is geplaatst op schokdempers om de eventuele invloed van trillingen te minimaliseren. De methaansensoren zijn genummerd als Axetris-1, Axetris-2, Axetris-3, Axetris-4 en worden de Alternatieve Methode (AM) genoemd.



**Figuur 3.2** Flowschema van de gebruikte Axetris sensor. Ingaande lucht wordt gefilterd met een filter met doorlaatopeningen van 10 µm. Als CH<sub>4</sub> sensor is de Axetris LGD Compact-A CH<sub>4</sub> gebruikt. Als pomp is een Thomas Diaphragm pump 1420VDP BLDC – 12V gebruikt en via de naaldklep is de flow afgesteld op 400 ml/min.

### 3.1.3 Standaard referentie methode

Als standaard referentiemethode wordt een luchtmonster gedurende 24 uur verzameld via de longmethode en geanalyseerd door een gaschromatograaf in het laboratorium. De standaard referentiemethode staat verder toegelicht in Mosquera et al. (2020).

### 3.1.4 Laboratoriumtests

Als uitgangssituatie is de beschrijving van de laboratoriumtests uit Vonk et al. (2021) genomen. Eventuele afwijkingen van en/of aanvullingen op het protocol zijn opgenomen in onderstaande paragrafen. De initiële labtests (responstijd, kalibratie, detectielimiet, herhaalbaarheid en instrumentherhaalbaarheid) evenals de bepaling van de vochtgevoeligheid zijn voor de vier sensoren tegelijkertijd uitgevoerd. Het drukeffect is alleen bepaald voor Axetris-1. De sensorwaarden zijn analoog opgeslagen via een datalogstelsel (CR1000; Campbell Scientific Inc., Logan, VS) met een frequentie van 0,1 Hz (s<sup>-1</sup>) waarbij de sensorwaarden van de voorafgaande 10 seconden zijn gemiddeld.

Via een gasverduunningssysteem (Signal Gas Divider 821, serienummer 6253) is stikstofgas (Scott Specialty Gases 99,999 vol% N<sub>2</sub>) gemengd met 98 ppm methaangas (Scott Specialty Gases; nauwkeurigheid ± 1%) om de gewenste concentraties te bereiken.

Een ander gasverduunningssysteem (Bronkhorst High-Tech BV, Ruurlo, NL) is gebruikt om de sensoren te testen op vochtgevoeligheid. Waterdamp is toegevoegd aan het referentiegas en gecontroleerd via een temperatuur en relatieve vochtigheid (RV) sensor (HMP110; Vaisala Oyj, Finland). Via de temperatuur, luchtvochtigheid en het aangeboden gas, is de aangeboden concentratie achteraf berekend.

### 3.1.4.1 Responstijd

Om de responstijd te bepalen is het aandeel methaangas op 0% en 100% van span ingesteld met een vochtgehalte van 30% RV. De tijd die benodigd is om 90% van de span- of nulwaarde te bereiken is de responstijd. Omdat de data met een frequentie van  $0,1 \text{ s}^{-1}$  gelogd is, is dit ook de hoogst haalbare nauwkeurigheid om dit kengetal te bepalen.

### 3.1.4.2 Kalibratie

De kalibratie is uitgevoerd met bevochtigd gas ingesteld op 40% RV. Het aandeel methaangas is ingesteld op de niveaus: 0% - 20% - 40% - 60% - 80% - 100% - 80% - 60% - 40% - 20% van span. De bijdrage aan de meetonzekerheid is bepaald via de lack-of-fit  $u_i(\text{lof})$  voor sensor  $i$  die wordt berekend met formule 1.

$$u_i(\text{lof}) = \frac{\rho_{\max,i}}{\sqrt{3}} \quad (1)$$

Waarin  $\rho_{\max,i}$  de maximale afwijking in ppm is tussen de aangeboden en gemeten concentratie met sensor  $i$ .

Een tweezijdige F-test met een significantiewaarde lager dan 0,05 is gebruikt om te testen of de varianties van aangeboden en gemeten concentraties van elkaar verschillen. Met een P-waarde  $> 0.05$ , is aangenomen dat de richtingscoëfficiënt en het snijpunt van de kalibratielijne niet significant verschillen van respectievelijk 1 en 0.

### 3.1.4.3 Detectielimiet, herhaalbaarheid, instrumentherhaalbaarheid

De data die gegenereerd is om de responstijd te bepalen is ook gebruikt om de detectielimiet, de herhaalbaarheid en de instrumentherhaalbaarheid te bepalen. De herhaalbaarheid is berekend via formule 2 en 3:

$$sd_{i,j} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (C_{i,j,k} - \bar{C}_{i,j})^2}{N-1}} \quad (2)$$

Met  $sd_{i,j}$  de standaarddeviatie van de herhaalbaarheid van sensor  $i$  op instelling  $j$  (nul of span).  $C_{i,j,k}$  is de gemeten concentratie van sensor  $i$  op instelling  $j$  tijdens de drie herhalingen  $k$ .  $\bar{C}_{i,j}$  is de gemiddelde concentratie van sensor  $i$  op instelling  $j$ .  $N$  is het aantal herhalingen ( $N = 4$  voor  $j = \text{nul}$ ;  $N = 3$  voor  $j = \text{span}$ ).

De herhaalbaarheid  $h$  van sensor  $i$  op instelling  $j$  is berekend met formule 3:

$$h_{i,j} = t * \sqrt{2} * sd_{i,j} \quad (3)$$

Met  $t$  de Student  $t$ -waarde ( $t = 2,35$  voor  $j = \text{nul}$ ;  $t = 2,91$  voor  $j = \text{span}$ ; 95%-betrouwbaarheidsinterval) en  $sd_{i,j}$  de standaard deviatie van de herhaalbaarheid zoals berekend met formule 2.

De detectielimiet  $d$  voor sensor  $i$  is berekend via formule 4:

$$d_i = 3 * sd_{i,j=\text{nul}} \quad (4)$$

De instrumentherhaalbaarheid is per instelling  $j$  (nul of span) bepaald aan de hand van formule 5:

$$sd_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (C_{i,j} - \bar{C}_j)^2}{N-1}} \quad (5)$$

Waarbij  $C_{i,j}$  de gemiddelde concentratie van sensor  $i$  op instelling  $j$  is en  $\bar{C}_j$  de gemiddelde concentratie van alle sensoren samen bij instelling  $j$ . Het aantal sensoren  $N$  was 4.

#### 3.1.4.4 Drukeffect

Omdat de Axetris-sensoren via infrarood de concentraties meten is er gekozen om een druktest uit te voeren. Vanwege de complexiteit van de meting is het drukeffect alleen getest voor Axetris-1. Omdat het aanvullende metingen zijn, is dit niet in strijd met het ontwikkel- en validatieprotocol. De aangeboden methaanconcentratie was 49 ppm (50% van span). De druk is gevarieerd tussen 600 en 1200 hPa met 20 tussenliggende punten.

Via een lineair model van de sensorrespons als functie van de luchtdruk in hPa is de richtingscoëfficiënt  $a$  bepaald. Via formule 6 is de bijdrage van een drukeffect aan de meetonzekerheid  $u(X_v)$  bepaald.

$$u(X_v) = a * \frac{1040 \text{ hPa} - 970 \text{ hPa}}{\sqrt{3}} \quad (6)$$

#### 3.1.4.5 Vochtgevoeligheid

De vochtgevoeligheid is bepaald door de RV te variëren tussen de volgende niveaus: 10-25%, 40-50%, 70-75% en 90-95% waarbij de methaanconcentratie bij elk van de vochniveaus is ingesteld op 0%, 20% en 80% van span.

Via een lineair model van de sensorrespons als functie van de relatieve luchtvochtigheid is de richtingscoëfficiënt  $a$  bepaald. Via formule 7 is de bijdrage van de luchtvochtigheid aan de meetonzekerheid  $u(X)$  bepaald.

$$u(X) = \sqrt{\frac{a^2}{3} * (51 - \bar{X})^2 + (51 - \bar{X})(100 - \bar{X}) + (100 - \bar{X})^2 + u(\text{lof})^2} \quad (7)$$

#### 3.1.4.6 Uitgebreide meetonzekerheid

De uitgebreide meetonzekerheid  $\sigma_i$  voor sensor  $i$  is bepaald met formule 8:

$$\sigma_i = 2 * \sqrt{u_i(\text{lof})^2 + u_{i=1}(X_v)^2 + u_i(X)^2} \quad (8)$$

Met  $u_i(\text{lof})$  als de meetonzekerheid op basis van de kalibratie voor sensor  $i$ ,  $u_{i=1}(X_v)$  de meetonzekerheid als gevolg van drukverschillen op basis van sensor Axetris-1 en  $U_i(X)$  de meetonzekerheid door vocht voor sensor  $i$ . Deze meetonzekerheid geldt wanneer de sensor wordt ingezet zonder te corrigeren voor de labkalibratie, drukverschillen en vochteffecten.

### 3.1.5 Validatie onder praktijkomstandigheden

De validatie onder praktijkomstandigheden is uitgevoerd in de periode van maart 2022 t/m juli 2023. De vier sensoren zijn geïnstalleerd in vier melkveestallen in Nederland.

### 3.1.6 Beoordeling validatie onder praktijkomstandigheden

#### 3.1.6.1 Uitbijter-selectie

Op basis van het relatieve verschil tussen AM en SRM per duplometing is gecontroleerd op uitbijters. De boxplot methode met driemaal de interkwartielafstand als maat voor uitbijters is hiervoor gebruikt en beschreven in formule 9.

$$Q_1 - 3 * (Q_3 - Q_1) \leq x \leq Q_3 + 3 * (Q_3 - Q_1) \quad (9)$$

Met  $Q_1$  en  $Q_3$  respectievelijk de 25% en 75% kwartielen van de relatieve verschillen tussen AM en SRM ( $x$ ).

### 3.1.6.2 Instrumentherhaalbaarheid

In juli 2023 zijn de sensoren gezamenlijk getest op 1 locatie om de instrumentherhaalbaarheid te bepalen. De standaard deviatie (sd) van de herhaalbaarheid is berekend met formule 10.

$$sd = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (AM_i - \overline{AM})^2}{N-1}} \quad (10)$$

Met  $AM_i$  de gemiddelde sensorrespons tijdens de referentiemeting,  $\overline{AM}$  de gemiddelde sensorrespons van alle sensoren gedurende de referentiemeting en  $N$  het aantal geteste sensoren (4). Vervolgens is de instrumentherhaalbaarheid  $h$  berekend met formule 11.

$$h = t * \sqrt{2} * sd \quad (11)$$

Met  $t$  de Student t-waarde (2,35) en  $sd$  het resultaat van formule 10.

### 3.1.6.3 Vergelijkbaarheid AM en SRM

Een orthogonale regressielijn is bepaald voor de relatie tussen AM en SRM. Het Ontwikkel- en validatieprotocol schrijft toetsingscriteria voor waarmee de resulterende richtingscoëfficiënt en snijpunt kunnen worden beoordeeld. Deze toetsingscriteria zijn afhankelijk van de standaarddeviatie van de herhaalbaarheid van de SRM. Deze standaarddeviatie van de herhaalbaarheid van de SRM ( $sd_{SRM}$ ) is berekend met formule 12.

$$sd_{SRM} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_1} (SRM_{i,1} - \overline{SRM})^2 + \sum_{i=1}^{N_2} (SRM_{i,2} - \overline{SRM})^2}{N_1 + N_2 - 1}} \quad (12)$$

Met  $SRM_{i,1}$  en  $SRM_{i,2}$  de uitkomst van referentiemeting  $i$  voor respectievelijk duplo 1 en 2 met  $N_1$  en  $N_2$  als bijbehorend aantal referentiemetingen.

Omdat zowel de AM als de SRM een meetfout heeft, is er een orthogonale regressielijn berekend waarin de onzekerheid van beide factoren is meegenomen. Snijpunt  $a$  en richtingscoëfficiënt  $b$  moeten voldoen aan de volgende acceptatiecriteria:

$$1 - \frac{sd_{SRM}}{SRM} \leq b \leq 1 + \frac{sd_{SRM}}{SRM}$$
$$-sd_{SRM} \leq a \leq sd_{SRM}$$

Waarin  $sd_{SRM}$  is gedefinieerd als de standaarddeviatie van de herhaalbaarheid van de SRM en  $\overline{SRM}$  als de gemiddelde waarde van de SRM van alle uitgevoerde referentiemetingen inclusief duplo's.

## 3.2 Resultaten

### 3.2.1 Laboratoriumtesten

Elk van de vier geteste Axetris sensoren voldoet aan de gestelde criteria volgens het ontwikkel- en validatieprotocol (Vonk et al., 2021). De resultaten van de verschillende testen per sensor zijn weergegeven in Tabel 3.1 en de volledige dataset is opgenomen in Bijlage 3. Onderstaande paragrafen geven een toelichting op de uitgevoerde labtesten.

**Tabel 3.1** Uitkomsten van de labtesten per sensor inclusief het gestelde criterium uit Vonk et al. (2021).

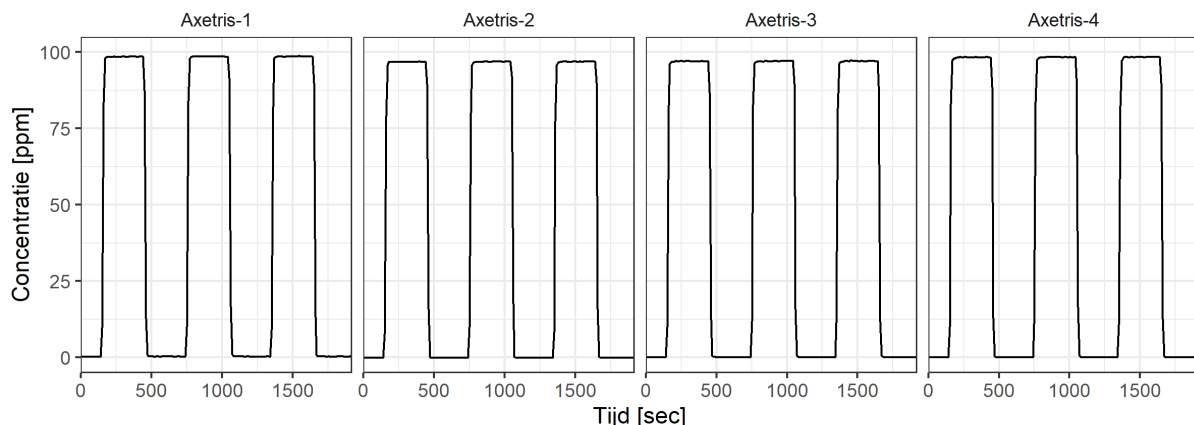
Kenmerk	Eenheid	Axetris-1	Axetris-2	Axetris-3	Axetris-4	Criterium	Voldoet
<b>Voor praktijkvalidatie</b>							
Responstijd $t_{90}$	s	30	30	30	30	< 900	✓
Kalibratielijns mrt-2022 (voor praktijkvalidatie)		0,991x - 0,264	1,001x + 0,421	1,003x + 0,157	0,989x + 0,148	-	n.v.t.
Meetonzekerheid door lack-of-fit	ppm	0,75	0,37	0,24	0,59	< 8	✓
P-waarde F-test a en b		0,999	0,999	0,999	0,999	> 0,05**	✓
Detectielimiet	ppm	0,028	0,014	0,011	0,027	< 5	✓
Herhaalbaarheid op detectielimiet	ppm	0,031	0,015	0,013	0,030	< 0,5	✓
Herhaalbaarheid op span (98 ppm)	ppm	0,124	0,188	0,151	0,203	< 5	✓
Instrumentherhaalbaarheid op detectielimiet	ppm		0,54			< 0,5	✗
Instrumentherhaalbaarheid op span	ppm		2,86			< 5	✓
Meetonzekerheid door luchtdruk	ppm	0,55	-	-	-	< 5	✓
Richtingscoëfficiënt vochtgevoeligheid	ppm / %RV	-0,007	-0,007	-0,006	-0,005	-	n.v.t.
Meetonzekerheid door vocht (80 ppm)	ppm	0,153	0,153	0,131	0,111	-	n.v.t.
Uitgebreide meetonzekerheid	ppm	1,890	1,374*	1,242*	1,640*	-	n.v.t.
<b>Na praktijkvalidatie</b>							
Kalibratielijns jul-2023		0,988x - 0,256	1,001x + 0,381	0,997x - 0,554	0,985x - 0,015	-	n.v.t.

\*Als bijdrage van drukverschillen op de meetonzekerheid is aangenomen dat het drukeffect van Axetris-1 representatief is voor de andere sensoren.

\*\*Dit criterium wijkt af van Vonk et al. (2021) i.v.m. discussie over de interpretatie van de F-test.

#### 3.2.1.1 Responstijd

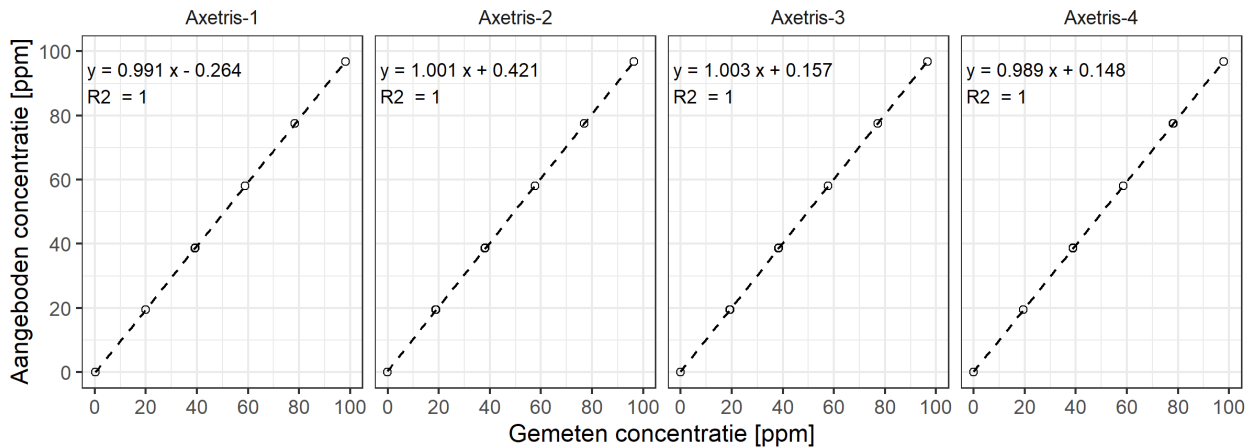
De responstijd  $t_{90}$  waarin de sensor 90% van de spanwaarde is gestegen/gedaald is voor elk van de sensoren gemiddeld 30 seconden. Ook voor elk van de individuele stijg- en daalmomenten was de  $t_{90}$  30 seconden. Omdat de sensorrespons is gelogd met een frequentie van 0,1 Hz, is de werkelijke responstijd lager dan bepaald in deze laboratoriumtest. De responstijd is onder het gestelde criterium van 900 seconden en voldoet daarmee aan het gestelde criterium. De sensorrespons per sensor voor de veranderingen van 0 naar span zijn weergegeven in Figuur 3.3.



**Figuur 3.3** Sensorrespons per sensor bij 3 herhaalde veranderingen van 0 ppm naar 98 ppm en terug naar 0 ppm.

### 3.2.1.2 Kalibratie

De gemeten CH<sub>4</sub> concentraties met de geteste sensoren wijken niet significant af van de aangeboden concentraties in de kalibratie voorafgaand en na afloop van de praktijkvalidatie. De kalibratielijnen per sensor zijn visueel weergegeven in Figuur 3.4 met de bijbehorende formules in Tabel 3.1. De bijdrage van de lack-of-fit aan de meetonzekerheid is per sensor weergegeven in Tabel 3.1. Het valt op dat de meetonzekerheid als gevolg van de lack-of-fit voor sensor 2 en 3 groter is dan voor sensor 1 en 4. Elk van de sensoren voldoet aan het gestelde criterium dat de meetonzekerheid als gevolg van een lack-of-fit lager moet zijn dan 8% van de span (98 ppm). De gemiddelde luchtvochtigheid van het aangeboden gas tijdens de kalibratie was 43% variërend tussen de 30% en 50% RV.



**Figuur 3.4** Gemeten concentratie vs. aangeboden concentratie per sensor binnen het bereik van 0-98 ppm met de stappen 0-20-40-60-80-100% van span (98 ppm).

### 3.2.1.3 Detectielimiet

De detectielimiet van elk van de vier sensoren is lager dan het gestelde criterium van 5 ppm CH<sub>4</sub> (Vonk et al., 2021) en voldoet daarmee aan de voorwaarde. Tabel 3.1 geeft een overzicht van de detectielimiet per sensor. Evenals voor de meetonzekerheid door de lack-of-fit, laten sensor 1 en 4 een vergelijkbaar niveau zien dat verschilt van het niveau van sensor 2 en 3.

### 3.2.1.4 Herhaalbaarheid

De herhaalbaarheid op detectielimiet en op span zijn weergegeven in Tabel 3.1 en voldoen aan de gestelde criteria van respectievelijk 10% en 5% van de minimaal vereiste detectielimiet (5 ppm CH<sub>4</sub>) en span (98 ppm). De sensoren zijn daarmee in staat om aangeboden methaanconcentraties consequent op hetzelfde niveau te meten.

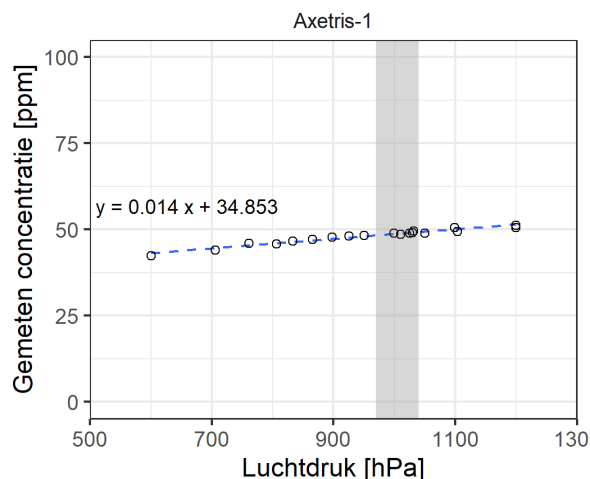
### 3.2.1.5 Instrumentherhaalbaarheid

De instrumentherhaalbaarheid op span voldoet aan het gestelde criterium van 5 ppm (5% van span). De instrumentherhaalbaarheid op de detectielimiet voldoet niet aan het gestelde criterium van 10% van de minimaal vereiste detectielimiet (5 ppm CH<sub>4</sub>). De geteste sensoren zijn daarmee alleen uitwisselbaar boven een nader te bepalen concentratieniveau.

### 3.2.1.6 Drukeffect

Het effect van een drukverschil op de metingen is gemeten bij een aangeboden methaanconcentratie van 49 ppm en gevisualiseerd in Figuur 3.5. Er is een lineair verband aanwezig tussen de luchtdruk en de gemeten concentratie met een regressiecoëfficiënt van 0,96 en een richtingscoëfficiënt van 0,014 ppm hPa<sup>-1</sup>. Het is aannemelijk dat deze richtingscoëfficiënt afhankelijk is van het concentratieniveau. Het effect van een drukverschil op de meetonzekerheid is gekwantificeerd in Tabel 3.1. Het effect van luchtdruk op de meetresultaten is aanwezig, maar heeft geen grote invloed op de meetonzekerheid vanwege het kleine drukverschil dat onder praktijkomstandigheden aanwezig is.

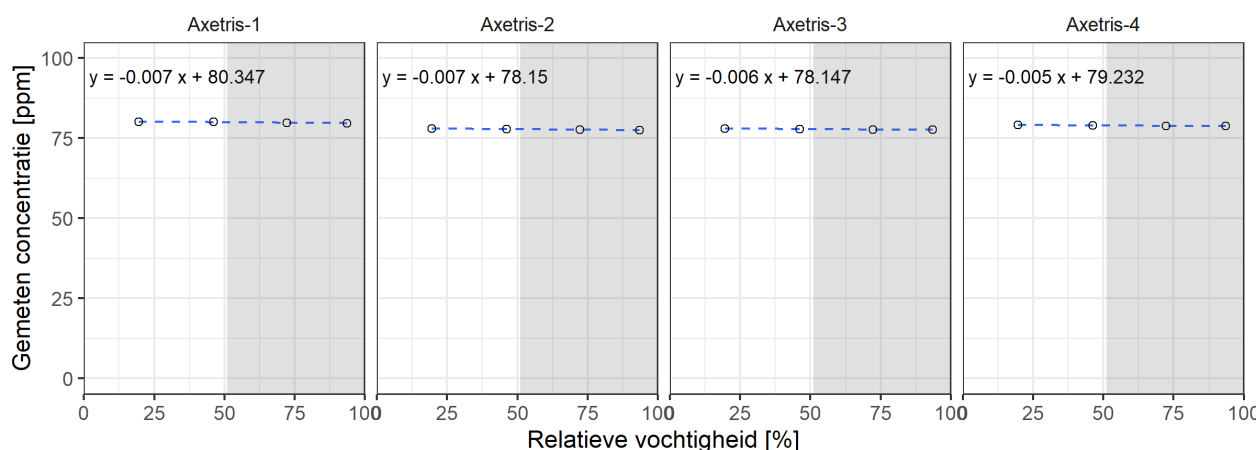




**Figuur 3.5** Luchtdruk vs. gemeten concentratie voor Axetris-1 bij een aangeboden concentratie van 49 ppm. Het grijs gearceerde oppervlak is de range waarbinnen de luchtdruk van de buitenlucht varieert in de praktijk.

### 3.2.1.7 Vochtgevoeligheid

De aanwezigheid van vocht in het aangeboden gas kan leiden tot een meetfout van  $\approx 0,15$  ppm (zie Tabel 3.1) bij een relatieve luchtvochtigheid tussen de 51% en 100% en een concentratie van 80 ppm. Figuur 3.6 geeft de afhankelijkheid van vocht weer per sensor.



**Figuur 3.6** Relatieve luchtvochtigheid vs. gemeten concentratie bij een aangeboden concentratie van 80 ppm. Het grijs gearceerde oppervlak is de range waarbinnen de relatieve luchtvochtigheid varieert in praktijkstallen voor melkvee (Vonk et al., 2021).

### 3.2.1.8 Uitgebreide meetonzekerheid

De uitgebreide meetonzekerheid is voor elk van de sensoren kleiner dan 2 ppm onder de aanname dat het drukeffect gelijk is over de verschillende sensoren. De uitgebreide meetonzekerheid per sensor is weergegeven in Tabel 3.1.

### 3.2.2 Praktijkvalidatie

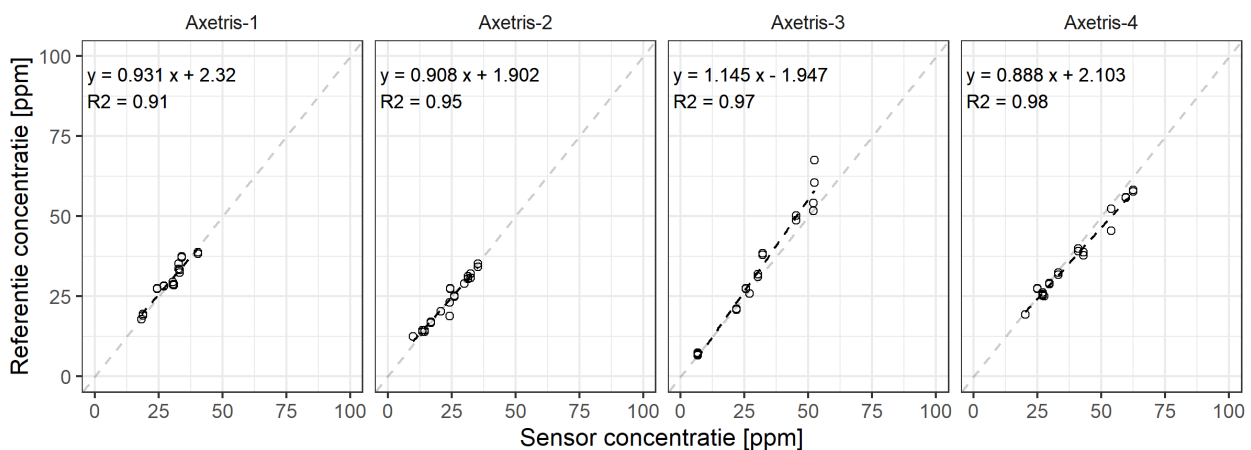
De resultaten van de praktijkvalidatie van de AM sensoren staan weergegeven in Tabel 3.2. De dataset met gemiddelde sensorwaarnemingen per referentiemeting staan in Bijlage 4. De geteste sensoren van Axetris voldoen aan de gestelde criteria voor een validatie onder praktijkomstandigheden in het Ontwikkel- en validatieprotocol (Vonk et al., 2021).

**Tabel 3.2** *Uitkomsten van de validatie onder praktijkomstandigheden per sensor inclusief het gestelde criterium uit Vonk et al. (2021).*

Kenmerk	Eenheid	Axetris-1	Axetris-2	Axetris-3	Axetris-4	Criterium	Voldoet
Aantal dagen in stal		476	457	455	428	$\geq 365$	✓
Aantal metingen in duplo		10	12	10	12	$\geq 6$	✓
Totaal aantal metingen		20	24	20	24	-	n.v.t.
- Waarvan missende waarden		1	-	-	-	-	n.v.t.
- Waarvan outliers		-	-	-	-	-	n.v.t.
Concentratierange [min; max]	ppm	[17,82; 38,72]	[13,90; 35,23]	[6,64; 67,51]	[19,26; 58,20]	-	n.v.t.
Kalibratielijijn		$0,931x + 2,32$	$0,908x + 1,902$	$1,145x - 1,947$	$0,888x + 2,103$	-	n.v.t.
Orthogonale regressie							
- Correlatiecoëfficiënt				0,970		$\geq 0,97$	✓
- Richtingscoëfficiënt				1,002x		$\geq 0,953$ $\leq 1,047$	✓
- Snijpunt	ppm			0,086		$\geq -1,421$ $\leq 1,421$	✓
Instrument-herhaalbaarheid	ppm			0,527		$\leq 5,480$	✓

#### 3.2.2.1 Vergelijking sensoren met referentiemethode

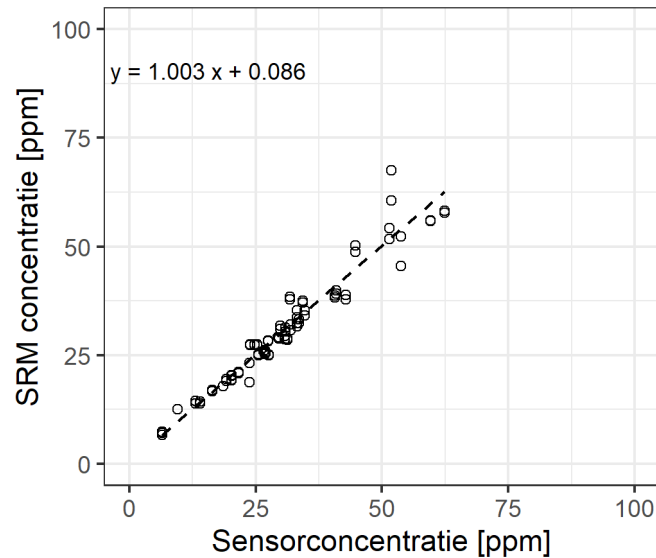
De vergelijking tussen de geteste sensoren en de SRM leidt tot een relatie zoals weergegeven in Figuur 3.7. Onder praktijkomstandigheden is er door de sensoren binnen een verschillend concentratiebereik gemeten. De minimum en maximum concentratie onder praktijkomstandigheden op basis van de SRM is per sensor weergegeven in Tabel 3.2. Opvallend is dat de sensoren Axetris-1, Axetris-2 en Axetris-4 een richtingscoëfficiënt  $< 1$  hebben terwijl Axetris-3 een richtingscoëfficiënt  $> 1$  heeft. De regressiecoëfficiënt is voor elk van de sensoren  $> 0,90$ .



**Figuur 3.7** *Sensorrespons vs. gemeten concentratie via de SRM gedurende 1 jaar onder praktijkomstandigheden per sensor.*

### 3.2.2.2 Orthogonale regressie

Uit de orthogonale regressie volgt de regressielijn  $y = 1,002x - 0,086$  waarbij x en y een onderlinge correlatiecoëfficiënt hebben van 0.97 (zie ook Tabel 3.2). De regressielijn is weergegeven in Figuur 3.8. Zowel de richtingscoëfficiënt als het snijpunt voldoen aan de gestelde criteria opgesteld door Vonk et al. (2021).



**Figuur 3.8** Orthogonale regressielijn tussen sensorrespons en SRM concentratie gedurende 1 jaar onder praktijkomstandigheden met 4 sensoren.

### 3.2.2.3 Instrumentherhaalbaarheid

Instrumentherhaalbaarheid is getest als afronding van de validatieprocedure onder praktijkomstandigheden. De sensoren hebben een herhaalbaarheid van 0,527 ppm en deze waarde ligt daarmee onder het niveau van de SRM met een herhaalbaarheid van 1,421 ppm. De instrumentherhaalbaarheid voldoet daarmee ook aan het gestelde criterium van  $y = x$  met een maximale afwijking van 20% ten opzichte van de gemiddelde SRM-concentratie.

## 3.3 Discussie en conclusies validatietraject

Op basis van het doorlopen validatietraject bij melkvee voldoet de Axetris LGD-compact-A CH4 aan de criteria voor sensoren zoals gesteld in Vonk et al. (2021), waarmee is aangetoond dat de metingen van dit sensortype gelijkwaardig zijn aan metingen met de referentiemethode. De sensoren kunnen daarmee zonder correctie worden toegepast in de praktijk in melkveestallen. Op basis van dit onderzoek kan geen uitspraak gedaan worden over de drift van de sensor over de langere termijn.

---

## 4 Discussie, conclusies en aanbevelingen

In dit onderzoek is voor de eerste maal het ontwikkel- en validatieprotocol (Vonk et al., 2021) toegepast om een sensortype te beoordelen. Dit protocol is toegespitst op het beoordelen van sensoren voor het monitoren van gasconcentraties in stallen en hieruit te berekenen stalemissies. Het protocol beschrijft zowel laboratoriumtesten als een praktijktest. Leidend in het protocol is de praktijktest gericht op het aantonen van gelijkwaardigheid met de referentiemethode (GC-methode) onder praktijkomstandigheden en daarmee geschiktheid voor bedrijfsmonitoring van stalemissies. Het uitvoeren van laboratoriumtesten is niet verplicht, maar wordt wel aanbevolen omdat het nuttige aanvullende informatie oplevert. Het uitvoeren van laboratoriumtesten geeft voor onbekende sensortypes inzicht of er kans is op gelijkwaardigheid met de referentiemethode in een praktijktest, en is daarmee kostenbesparend. Het kan ook bruikbare informatie opleveren voor gebruik van sensoren in de praktijk. In dit onderzoek bleek bijvoorbeeld dat drukverschil weliswaar een klein lineair effect heeft op gemeten concentraties in het bereik waarin de luchtdruk zich bevindt, maar in opstellingen met grotere drukverschillen (bijvoorbeeld door toepassing van filters en pompen in de meetopstelling) een storende factor kan zijn. Het kan dan verstandig zijn druksensoren op te nemen in meetopstellingen waar het risico op grote drukverschillen kan optreden.

Zoals toegelicht in het protocol van Vonk et al. (2021) is het voldoen aan de criteria in de praktijkvalidatie doorslaggevend omdat de sensor hier wordt beproefd in de gehele matrix van gassen in stallen van de betreffende diercategorie, waardoor bekende en onbekende interferentie-effecten van mogelijke stoorcomponenten in beeld komen.

Uit de resultaten van de praktijkvalidatie kan geconcludeerd worden dat de sensor van het gebruikte type Axetris LGD Compact-A CH<sub>4</sub> gelijkwaardig is aan de referentiemethode en daarmee zonder correctie kan worden toegepast voor het meten van de methaanconcentratie in melkveestallen.

Dit goede resultaat doet geen afbreuk aan de noodzaak van praktijkvalidatie van dit sensortype in stallen met andere diercategorieën en in de buitenlucht. Stallucht van andere diercategorieën en buitenlucht hebben een ander concentratieniveau en een afwijkende matrix van gassen met mogelijk andere interferentie-effecten. Interferentie-effecten zijn ook afhankelijk van het meetprincipe en binnen het meetprincipe ook van de wijze waarop deze is toegepast. Het spreekt dus voor zich dat de resultaten van het geteste sensortype in melkveestallen niet overdraagbaar zijn naar andere sensortypes en uitvoeringen.

Waar ook rekening mee moet worden gehouden is dat het gevalideerde concentratiebereik van 0-100 ppm niet wordt overschreden. Dit is weliswaar niet gebeurt tijdens de praktijkvalidatie, maar methaanconcentraties boven de 100 ppm kunnen wel voorkomen in melkveestallen wanneer er beperkt wordt geventileerd. Voor deze situatie wordt aanbevolen de Axetris LGD Compact-A CH<sub>4</sub> ook te valideren met een hoger meetbereik.

Voor het berekenen van de methaanemissie uit melkveestallen moet ook de concentratie van methaan in de (binnenkomende) buitenlucht bekend zijn. Doordat de praktijktest is uitgevoerd bij stallucht kan deze sensor vooralsnog niet ingezet worden voor het bepalen van de concentratie in de buitenlucht. Hiervoor zal een extra validatietraject of andere methode (zoals de referentiemethode) moeten worden gebruikt.

De praktijkvalidatie wordt in het protocol over een periode van 1 jaar uitgevoerd. In dit onderzoek zijn de sensoren voorafgaand aan de praktijkvalidatie eenmalig gekalibreerd in het laboratorium. De gelijkwaardigheid met de referentiemethode is daarmee beperkt tot de periode van 1 jaar. Het effect van het gebruik en veroudering van de sensoren op drift op langere termijn dan 1 jaar is niet bekend. De vraag is of eenmalige kalibratie per jaar op langere termijn voldoende blijft om betrouwbaarheid te waarborgen. In het ontwikkel- en validatieprotocol wordt hierover opgemerkt dat door het ontbreken van langdurige ervaring met inzet van sensoren nog geen criteria voor kwaliteitscontrole op lange termijn kunnen worden geformuleerd. Aanbevolen wordt daarom om de sensoren van types die volgens het ontwikkel- en

---

validatieprotocol gelijkwaardig zijn bevonden, zoals de Axetris LGD Compact-A CH<sub>4</sub> sensor in dit onderzoek, te blijven volgen met referentiemetingen in de daarop volgende jaren. Dit levert inzicht in de levensduur, drift en storingsgevoeligheid bij langdurig gebruik. Op basis van deze informatie kunnen dan voorschriften worden ontwikkeld voor kwaliteitsbewaking van sensoren in bedrijfsmonitoring van stalemissies, en de uitwerking hiervan opgenomen worden in volgende versies van beoordelingsvoorschriften voor stalsensoren. Tot die tijd is het verstandig om de gebruikte sensoren van dit type jaarlijks in het lab te controleren en kalibreren.

Naast de nauwkeurigheid en de betrouwbaarheid van de toegepaste stalsensoren, zijn andere aspecten eveneens cruciaal om nauwkeurige emissiedata te verkrijgen ten behoeve van bedrijfsmonitoring van stalemissies. De volgende aspecten vragen aandacht voor een succesvolle ontwikkeling van effectieve bedrijfsmonitoring. De uitvoering en plaatsing van de bemonsteringpunten van stallucht voor het verkrijgen van een representatief beeld van gasconcentraties in binnen- en uitstromende stallucht is afhankelijk van de ventilatiemethode en staluitvoering en luistert zeer nauw. Met name voor natuurlijk geventileerde stallen kan dit afhankelijk van de staluitvoering complex zijn en bij onjuiste uitvoering de grootste bron van onnauwkeurigheid in gemeten emissie. Tot dusverre zijn specifiek voor bedrijfsmonitoring nog geen handleidingen en voorschriften geformuleerd waaraan bemonsteringsapparatuur in de praktijk aan moet voldoen.

Daarnaast is de kwaliteit van dataverwerking een belangrijk onderdeel in de uiteindelijke nauwkeurigheid van bedrijfsmonitoring van stalemissies. Dit vraagt om gestandaardiseerde procedures voor het opsporen van onrealistische of verdachte meetgegevens, procedures voor reguliere aanpassing van kalibratielijnen van sensoren, procedures voor invoer van benodigde bedrijfsinformatie (met name bij gebruik van de CO<sub>2</sub>-ratiomethode) en vastgelegde standaardprocedures voor berekening en rapportage van emissies.

---

# Literatuur

- Mosquera, J., J.P.M. Ploegaert, G.C.C. Kupers, 2020. Determination of carbon dioxide concentrations in air from livestock housing systems; Reference using the lung method as applied by Wageningen Livestock Research. Wageningen Livestock Research, Report 1284.
- Mosquera, J., H.J.C. van Dooren, N.W.M. Ogink, E.A.P. van Well, en G.J. Monteny, 2021; Monitoring van methaan-, ammoniak-, en lachgasemissies uit melkveestallen. Openbaar Rapport 1286. Wageningen: Wageningen Livestock Research.
- Net, L. van der, P.W.H.G. Coenen, J.D. Rienstra, P.J. Zijlema, E.J.M.M. Arets, K. Baas, R. Dröge, K. Geertjes, M. 't Hoen, E. Honig, B. van Huet, S.E. de Bie, R.M. te Molder, J.A. Montfoort, en T.C. van der Zee. 2023. National Inventory Report 2023. Greenhouse gas emissions in the Netherlands 1990-2021. RIVM report 2023-0052. Bilthoven: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu.
- Schep, C.A., H.J.C. van Dooren, J. Mosquera, E.A.P. van Well, J.A. Keuskamp, en N.W.M. Ogink. 2022. Monitoring van methaan-, ammoniak- en lachgasemissies uit melkveestallen. Praktijkmetingen in de periode oktober 2018 – oktober 2020. Openbaar Rapport 1388. Wageningen: Wageningen Livestock Research.
- Vonk, J., D. van Dinther, J. Mosquera, en N.W.M. Ogink. 2021. Ontwikkel- en validatieprotocol meetinstrumenten voor gasconcentraties in bedrijfsmonitoring van NH<sub>3</sub> en CH<sub>4</sub> uit veehouderijen. Toepassing bij sensorsystemen voor vaststellen van stalemissies. Rapport 1285. Wageningen: Wageningen Livestock Research.

# Bijlage 1 Startliteratuur

Author	Title	Reference
Fakra et al. (2020)	A simple and low-cost integrative sensor system for methane and hydrogen measurement	Sens. Int. 1, 100032
Collier-Oxandale et al. (2018)	Assessing a low-cost methane sensor quantification system for use in complex rural and urban environments	Atmos. Meas. Tech. 11, 3569-3594
Eugster & Kling (2012)	Performance of a low-cost methane sensor for ambient concentration measurements in preliminary studies	Atmos. Meas. Tech. 5, 1925-1934
Formisano et al. (2004)	Detection of Methane in the Atmosphere of Mars	Science 306 (5702), 1758-1761
Gislon et al. (2020)	Milk production, methane emissions, nitrogen and energy balance of cows fed diets based on different forage systems	J. Dairy Sci. 103, 8048-8061
Gong & Zhu (2016)	Development of highly sensitive sensor system for methane utilizing cataluminescence	Luminescence 31, 183-189
Knobelspies et al. (2016)	Low-cost gas sensing system for the reliable and precise measurement of methane, carbon dioxide and hydrogen sulfide in natural gas and biomethane	Sens. Actuators B 236, 885-892
Massie et al. (2006)	Design of a portable optical sensor for methane gas detection	Sens. Actuators B 113, 830-836
Pavlovsky (2020)	Patent Application Publication – Methane gas sensor	Pub. No.: US 2020/0249202 A1
Riddick et al. (2018)	Development of a low-maintenance measurement approach to continuously estimate methane emissions: A case study	Waste Manage. 73, 210-219
Riddick et al. (2020)	The calibration and deployment of a low-cost methane sensor	Atmos. Environ. 230, 117440
Sekhar et al. (2016)	Development and testing of an electrochemical methane sensor	Sens. Actuators B 228, 162-167
Shaan et al. (2016)	Promising methane gas sensor synthesized by microwave-assisted Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> nanoparticles	Mater. Sci. Semicond. Process. 46, 1-5
Shen et al. (2018)	Methane hotspot localization and visualization at a large-scale Xi'an landfill in China: Effective tool for landfill gas management	J. Environ. Manage. 225, 232-241
Yang et al. (2020)	Selective detection of methane by HZSM-5 zeolite/Pd-SnO <sub>2</sub> gas sensors	Sens. Actuators B 321, 128567

## Bijlage 2 Concentratieverloop tijdens praktijktest



**Figuur B2.1** Gemeten concentratie tijdens praktijktest in de periode van juli 2021 tot november 2021 voor de sensoren ABB (0-100 ppm), ABB (0-500 ppm), Axetris (0-100 ppm) en de standaard referentiemethode.



## Bijlage 3 Dataset van labmetingen

**Tabel B3.1** *Conditie van het aangeboden gas en de gemeten concentratie door de sensoren Axetris-1, Axetris-2, Axetris-3, Axetris-4.*

Proef	Aangeboden gas			Gemeten gas			
	Concentratie [ppm]	Luchtvochtigheid [%]	Temperatuur [°C]	Axetris-1 [ppm]	Axetris-2 [ppm]	Axetris-3 [ppm]	Axetris-4 [ppm]
Responstijd	0,0	35%	20,5	20,2	19,9	20,0	20,0
Responstijd	98,0	34%	20,5	98,9	97,5	97,6	98,7
Responstijd	0,0	33%	20,5	20,2	19,9	20,0	20,0
Responstijd	98,0	32%	20,6	98,9	97,6	97,7	98,7
Responstijd	0,0	32%	20,6	20,2	19,9	20,0	20,0
Responstijd	98,0	31%	20,6	98,9	97,6	97,7	98,7
Responstijd	0,0	31%	20,7	20,2	19,9	20,0	20,0
Kalibratie	0,0	31%	20,7	20,2	19,9	20,0	20,0
Kalibratie	19,6	30%	20,7	36,0	35,2	35,5	35,6
Kalibratie	39,1	42%	20,8	51,5	50,6	50,7	51,1
Kalibratie	58,7	50%	21,0	67,1	66,1	66,1	66,9
Kalibratie	78,4	49%	21,1	82,7	81,6	81,7	82,5
Kalibratie	98,0	48%	21,4	98,5	97,1	97,3	98,3
Kalibratie	78,4	47%	21,6	82,7	81,6	81,7	82,5
Kalibratie	58,7	46%	21,8	67,1	66,1	66,1	66,9
Kalibratie	39,1	45%	21,9	51,4	50,4	50,6	51,1
Kalibratie	19,6	45%	22,1	35,9	35,0	35,3	35,5
Vochtgevoeligheid	0,0	1%	21,6	20,7	19,9	20,0	20,0
Vochtgevoeligheid	0,0	19%	22,3	20,7	19,9	20,0	20,0
Vochtgevoeligheid	0,0	46%	22,0	20,8	19,9	20,0	20,0
Vochtgevoeligheid	0,0	72%	21,9	20,8	19,9	20,0	20,0
Vochtgevoeligheid	0,0	93%	21,8	20,8	19,9	20,0	20,0
Vochtgevoeligheid	19,6	1%	21,4	36,3	35,0	35,3	35,5
Vochtgevoeligheid	19,6	19%	22,2	36,4	35,0	35,2	35,4
Vochtgevoeligheid	19,6	46%	21,9	36,3	34,8	35,1	35,3
Vochtgevoeligheid	19,6	72%	21,8	36,1	34,6	34,9	35,2
Vochtgevoeligheid	19,6	93%	21,8	36,0	34,5	34,8	35,1
Vochtgevoeligheid	78,4	0%	21,2	84,0	82,5	82,5	83,5
Vochtgevoeligheid	78,4	20%	22,2	83,8	82,1	82,1	83
Vochtgevoeligheid	78,4	46%	21,9	83,3	81,5	81,6	82,5
Vochtgevoeligheid	78,4	72%	21,8	82,7	81,0	81,0	81,9
Vochtgevoeligheid	78,4	94%	21,8	82,2	80,5	80,6	81,5

## Bijlage 4 Dataset van AM-SRM metingen

**Tabel B4.1** Paarsgewijze waarnemingen Axetris (AM) en longmethode + GC (SRM) inclusief heersende omgevingscondities, \* is outlier, - missende waarde,

Sensor	Dag in jaar	Temperatuur [°C]	Relatieve luchtvochtigheid [%]	Windsnelheid [m/s]	Concentratie AM [ppm]	Concentratie SRM duplo 1 [ppm]	Concentratie SRM duplo 2 [ppm]
Axetris-1	88	8,5	82,0	2,8	19,2	19,5	19,1
Axetris-1	153	12,7	71,0	1,9	27,4	28,2	28,3
Axetris-1	234	21,4	69,8	1,6	33,2	35,2	33,6
Axetris-1	264	10,5	77,3	1,4	34,3	37,5	37,1
Axetris-1	300	15,5	83,1	3,0	33,5	32,4	33,2
Axetris-1	17	2,7	82,8	2,8	40,7	38,7	38,3
Axetris-1	51	8,3	91,9	4,2	31,3	28,9	28,5
Axetris-1	87	8,2	78,5	3,6	30,8	28,6	29,4
Axetris-1	143	11,2	67,9	3,3	18,6	-	17,8
Axetris-1	200	17,4	71,6	2,2	24,8	27,5	27,3
Axetris-2	136	17,3	70,1	2,4	16,4	17,0	16,7
Axetris-2	202	19,8	85,8	2,9	14,0	14,3	13,9
Axetris-2	227	23,0	62,8	2,5	13,1	14,4	13,9
Axetris-2	262	11,2	81,4	2,0	25,5	24,9	25,2
Axetris-2	297	13,8	87,5	4,3	23,8	18,8	23,1
Axetris-2	333	7,8	98,8	1,4	34,7	35,2	34,1
Axetris-2	17	-1,1	85,2	2,7	30,9	30,5	31,3
Axetris-2	53	7,7	92,0	2,0	31,9	32,0	30,7
Axetris-2	88	7,5	74,6	4,2	29,4	29,0	29,0
Axetris-2	130	13,2	90,3	1,4	20,3	20,3	20,4
Axetris-2	192	20,4	72,7	4,9	9,6	12,5	12,5
Axetris-2	200	17,4	71,6	2,2	24,0	27,5	27,3
Axetris-3	125	11,7	77,1	1,5	51,8	60,5	67,5
Axetris-3	193	19,1	73,5	1,9	31,7	37,9	38,5
Axetris-3	229	19,5	88,2	2,2	29,8	31,0	31,8
Axetris-3	264	10,5	78,1	1,5	44,7	50,2	48,7
Axetris-3	297	14,3	84,6	4,0	6,5	6,6	6,7
Axetris-3	334	4,3	92,6	1,9	26,5	25,8	25,9
Axetris-3	17	2,4	82,5	2,8	51,4	54,2	51,8
Axetris-3	51	8,2	92,8	3,6	21,6	20,8	21,1
Axetris-3	143	14,4	71,4	4,8	6,6	7,1	7,4
Axetris-3	200	17,4	71,6	2,2	25,3	27,5	27,3
Axetris-4	138	19,7	77,0	2,5	26,9	25,4	25,7
Axetris-4	181	22,4	64,5	2,6	33,1	31,7	32,4
Axetris-4	208	15,1	68,4	2,5	40,9	39,1	39,9
Axetris-4	227	23,9	60,8	2,7	29,6	29,1	28,8
Axetris-4	263	11,1	75,8	2,4	42,8	37,8	38,8
Axetris-4	298	13,6	86,5	4,4	20,2	19,3	19,3
Axetris-4	332	7,6	97,7	1,7	62,4	57,7	58,2

Sensor	Dag in jaar	Temperatuur [°C]	Relatieve luchtvochtigheid [%]	Windsnelheid [m/s]	Concentratie AM [ppm]	Concentratie SRM duplo 1 [ppm]	Concentratie SRM duplo 2 [ppm]
Axetris-4	17	-0,5	80,4	3,0	53,7	52,3	45,4
Axetris-4	87	7,5	75,2	4,0	27,6	25,0	25,1
Axetris-4	130	13,1	91,4	1,5	59,5	56,0	55,8
Axetris-4	193	19,9	75,2	4,6	26,9	25,3	26,2
Axetris-4	200	17,4	71,6	2,2	24,9	27,5	27,3

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](mailto:info.livestockresearch@wur.nl)  
[www.wur.nl/livestock-research](http://www.wur.nl/livestock-research)

---

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

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

