



Vlaanderen
is landbouw & visserij

ILVO Mededeling D/2025/01
December 2024

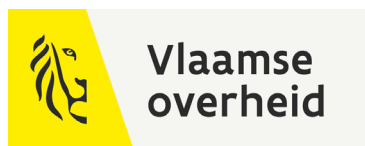
**Screening van meetmethodes voor de bepaling
van het ventilatiedebiet bij de uitvoering
van emissiemetingen in veestallen**

ILVO

Instituut voor Landbouw-,
Visserij- en Voedingsonderzoek

www.ilvo.vlaanderen.be

Opdrachtgever



**DEPARTEMENT
OMGEVING**

**Screening van meetmethodes voor de bepaling van
het ventilatiedebiet bij de uitvoering van
emissiemetingen in veestallen**

ILVO MEDEDELING D/2025/01

December 2024

ISSN 1784-3197

Wettelijk Depot: D/2025/10.970/01

Auteurs

An Verfaillie

Loes Laanen

Kobe Coorevits

Tinka De Decker

Chari Vandenbussche

Eva Brusselman

INHOUD

1	Definities.....	2
2	Inleiding.....	3
3	Meetmethodes.....	5
3.1	Meetwaaier.....	5
3.2	Ventilator met registratie.....	7
3.3	Anemometer/windmeter.....	7
3.4	Tracergas ratio methode.....	8
3.5	CO ₂ -massabalans methode.....	12
3.6	Warmtebalans methode.....	14
3.7	Vochtigheidsbalans methode.....	15
4	Toegestane meetmethodes in (inter)nationale meetprotocollen.....	17
4.1	VERA.....	17
4.2	Denemarken.....	18
4.3	Duitsland.....	19
4.4	Frankrijk.....	19
4.5	Nederland.....	20
4.6	Vlaanderen.....	20
4.7	Discussie.....	21
4.7.1	Mechanisch geventileerde stallen.....	21
4.7.2	Natuurlijk geventileerde stallen.....	22
5	Conclusie.....	30
6	Referenties.....	31

1 DEFINITIES

Accuraatheid / Nauwkeurigheid = "De mate van overeenstemming tussen een gemeten waarde en de werkelijke waarde, in termen van juistheid en precisie. Hoe groter de nauwkeurigheid hoe kleiner de totale fout en foutenmarge" (RVO, 2015).

Correlatie = Een statistische samenhang tussen twee of meerdere variabelen. Een correlatie geeft de sterkte weer van een (lineaire) relatie tussen de variabelen.

Correlatiecoëfficiënt = Een coëfficiënt, gelegen tussen 0 en 1, die de sterkte van de correlatie weergeeft. Hoe hoger de coëfficiënt, hoe sterker de correlatie.

Luchtstaal = een specifiek volume lucht bemonsterd uit de stallucht, waarvan de gasconcentratie wordt bepaald. Afhankelijk van hoe een luchtstaal bemonsterd wordt, is een luchtstaal representatief aan de stallucht die de stal verlaat (VERA, 2018).

Meetmethode = omsluit alle procedures en middelen om het ventilatiedebiet te bepalen (inclusief, toepassingsgebied, procedure en meetinstrument) (VERA, 2018).

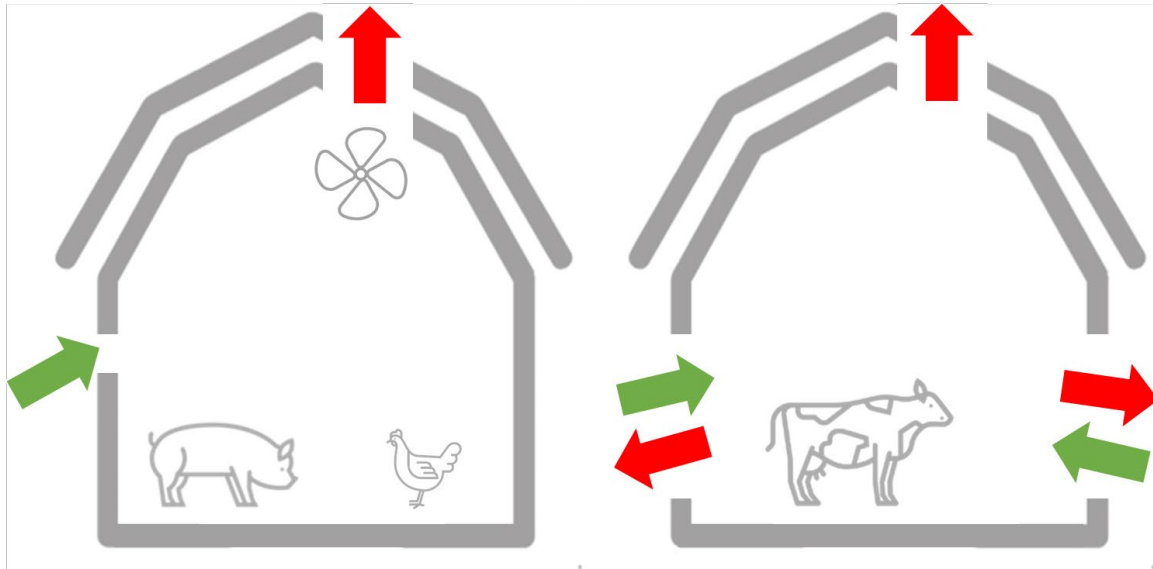
Meetonzekerheid = parameter die de dispersie van de meetwaarden karakteriseert, gekoppeld aan de meetgrootte (in dit geval het ventilatiedebiet). Hoe groter de meetonzekerheid, hoe minder betrouwbaar het resultaat (EN ISO 21877: 2019) (ISO, 2019).

2 INLEIDING

Om de emissie van pollutanten uit veestallen te bepalen worden twee parameters bemeten. De ene parameter betreft het concentratieverschil van het pollutant tussen de stallucht en de buitenlucht. De andere parameter betreft de hoeveelheid lucht die de stal verlaat, met name het ventilatiedebiet. Door het verschil in concentratie in de ingaande en uitgaande lucht van de stal te combineren met het ventilatiedebiet kan de emissie berekend worden (Hassouna *et al.*, 2016). Voor de bepaling van het ventilatiedebiet van een stal wordt onderscheid gemaakt tussen mechanisch- en natuurlijk geventileerde stallen volgens onderstaande definities (Figuur 2.1).

Mechanisch geventileerde stal = stal met goed gedefinieerde lucht in- en uitlaten, waarbij de lucht de stal verlaat via een uitlaat/ventilatieschacht (VERA, 2018b). Bij mechanisch geventileerde stallen creëren ventilatoren een luchtstroom waardoor via onderdruk de stallucht via de ventilatieschacht(en) wordt weggezogen. De luchtinvoer via luchtopeningen wordt (automatisch) gereguleerd, om zo een stabiel stalklimaat te behouden. Pluimvee-, varkens- en vleeskalverstallen zijn in Vlaanderen in hoofdzaak mechanisch geventileerd (Figuur 2.2).

Natuurlijk geventileerde stal = stal waarbij de ventilatie in hoofdzaak berust op natuurlijke luchtverversing. Deze stallen bevatten luchtopeningen aan de zijkanten en/of in de nok van het dak. De luchtcirculatie kan bijkomend gestimuleerd worden door het plaatsen van ventilatoren in de stal. Daarnaast kan de luchtinvoer beperkt worden door het (deels) afsluiten van de luchtopeningen via (geautomatiseerde) schermen. Melk- en vleesveestallen zijn in Vlaanderen in hoofdzaak natuurlijk geventileerd (Figuur 2.2).



Figuur 2.1: Schematische weergave van een mechanisch (links) en natuurlijk (rechts) geventileerde stal inclusief de meest voorkomende diercategorieën die in dit type van stal gehuisvest worden. De pijlen duiden de voornaamste lucht in- (groen) en uitvoer (rood) aan.

Dit rapport focust op de meetmethodes die aangewend kunnen worden om het ventilatiedebiet te bepalen bij de uitvoering van emissiemetingen bij veestallen. Na de omschrijving van de diverse beschikbare meetmethodes (Hoofdstuk 3), wordt in het vierde hoofdstuk opgesteld welke meetmethodes toegelaten of 'erkend' zijn in diverse (inter)nationale meetprotocollen voor de bepaling van het ventilatiedebiet in stallen. Het rapport bespreekt de mogelijke meetmethodes (Hoofdstuk 4) en eindigt met een conclusie (Hoofdstuk 5) rond meetmethodes voor de bepaling van het ventilatiedebiet in een veestal.

3 MEETMETHODES

Voor de bepaling van het ventilatiedebiet in een stal kunnen zowel directe als indirecte meetmethodes worden ingezet. Via directe methodes wordt het ventilatiedebiet rechtstreeks gemeten op basis van debietmetingen (3.1 Meetwaaier tot en met 3.3 Anemometers). Via indirecte methodes wordt het ventilatiedebiet onrechtstreeks bepaald door het ventilatiedebiet af te leiden op basis van een balansvergelijking (3.4 Tracergas ratio methode tot en met 3.7 Vochtigheidsbalans methode).

3.1 MEETWAAIER

Een eerste directe methode ter bepaling van het ventilatiedebiet is een meetwaaier. Een meetwaaier is een vrij-draaiende meetturbine en geeft een vast aantal signalen per draaiing die per seconde worden geregistreerd. Het aantal draaiingen per seconde is een maat voor de rotatiesnelheid van de meetwaaier. De afgevoerde luchtstroom laat de meetwaaier ronddraaien. Via de diameteroppervlakte van de meetwaaier en de rotatiesnelheid wordt het luchtvolume bepaald dat de stal verlaat, en dus het ventilatiedebiet (Mosquera *et al.*, 2014; VERA, 2018b).

Een meetwaaier wordt toegepast bij mechanisch geventileerde stallen met afvoering van de stallucht via een of meerdere uitlaatschachten. Deze uitlaatschachten zijn voorzien van een ventilator, of verzamelen zich in een centrale uitlaat. Net voor de uitlaat(schacht), op voldoende afstand (bij voorkeur twee keer de diameter van de uitlaatschacht), wordt een meetwaaier geplaatst om de luchtstroom te meten die de stal verlaat. De meetwaaier is voorzien van een instroomrand om een turbulente flow (wervelingen) te verminderen (Wageningen UR Livestock Research, 2024). De meetwaaier beslaat de hele uitlaat-diameter van de schacht en is vooraf gekalibreerd (VERA, 2018b).

De kalibratie van de meetwaaier gebeurt in een windtunnel, om de rotatiesnelheid van de meetwaaier te koppelen aan het ventilatiedebiet doorheen de windtunnel (Wageningen UR Livestock Research, 2024). De kalibratie gebeurt over de volledige range van het toegepaste ventilatiedebiet in de stal. De positie van de meting van het ventilatiedebiet in de windtunnel is het meetvlak. Dit meetvlak is een dwarse doorsnede van de windtunnel. Het meetvlak is gesitueerd waar de luchtstroom doorheen de windtunnel homogeen is en een laminaire flow kent. De axiale gassnelheid op verschillende meetpunten in het meetvlak wordt gemeten met referentiemetingen om een gemiddeld ventilatiedebiet doorheen de windtunnel te bepalen (LUC, 2020). Voor deze

referentiemetingen wordt een pitotbuis of vleugelrad anemometer gebruikt (Monica *et al.*, 2021). De Europese norm EN ISO 16911-1 (CEN, 2013) beschrijft de voorwaarden waaraan deze pitotbuizen of vleugelrad anemometers dienen te voldoen.

Het gebruik van een meetwaaier is eenvoudig en robuust en laat toe het ventilatiedebiet direct en in principe accuraat (± 5 % foutenmarge) te meten (VERA, 2018b). Verschillende studies baseerden zich op een meetwaaier ter bepaling van het ventilatiedebiet in mechanisch geventileerde stallen voor verschillende diercategorieën: (Borowski *et al.*, 2017; Casey *et al.*, 2003; Chai *et al.*, 2012), (Hassouna *et al.*, 2016; Mosquera *et al.*, 2022a, 2022b; Mosquera *et al.*, 2022c; Ogink *et al.*, 2017; van Dooren *et al.*, 2023). De meetwaaier is echter gevoelig aan stof en moet daarom frequent (jaarlijks) schoongemaakt en periodiek gekalibreerd worden om een correcte meting te garanderen (Hassouna *et al.*, 2016; Mosquera *et al.*, 2014; VERA, 2018b; Wageningen UR Livestock Research, 2024).

De meetwaaier wordt op voldoende afstand stroomopwaarts van de aanwezige ventilator geplaatst, opdat deze (druk)onafhankelijk van de ventilator kan functioneren (Hassouna *et al.*, 2016; VERA, 2018b). Ten opzichte van de aanwezige ventilator zal de meetwaaier iets trager reageren. Wanneer de luchtstroom zeer laag is, bestaat de kans dat de meetwaaier geen luchtstroom registreert, waardoor het ventilatiedebiet via een meetwaaier op dat moment niet bepaald kan worden.

Meetwaaiers zijn enkel geschikt om het ventilatiedebiet te bepalen van stallen met goed gedefinieerde uitlaten/uitlaatschachten Dit is het geval voor mechanisch geventileerde stallen (Hassouna *et al.*, 2016) maar niet voor natuurlijk geventileerde stallen. Om de uitgaande luchtstroom van de stal correct te meten, moet minimaal de helft van elke set identieke uitlaatschachten (zelfde merk, type, leeftijd, onderhoudsstatus, grootte uitlaatschacht) die de stal rechtstreeks verlaten en die in gebruik zijn in de stal voorzien worden van een gekalibreerde meetwaaier (Wageningen UR Livestock Research, 2024). Sommige stallen hebben een groot aantal ventilatieschachten (bijvoorbeeld stallen met vleeskippen), waardoor het voorzien van een meetwaaier in elke ventilatieschacht arbeidsintensief wordt en de kost van een meetmethode via meetwaaiers hoog oploopt (Mosquera *et al.*, 2014). Daarnaast varieert de grootte van een ventilatieschacht in stallen sterk (35 – 140 cm) (provincie Limburg, 2015). Voor een ventilatieschacht met grote diameter (> 92 cm) zijn vaak geen meetwaaiers beschikbaar (persoonlijke communicatie meetploeg Milieutechniek, Instituut voor Landbouw, Visserij en Voedingsonderzoek, februari 2023). In deze gevallen zijn alternatieve meetmethodes aangewezen.

3.2 VENTILATOR MET REGISTRATIE

De laatste jaren zijn steeds meer mechanische geventileerde stallen uitgerust met ventilatoren met registratie. Deze ventilatoren ondersteunen de klimaatsturing voor het binnenklimaat van de stal. De ventilatoren registreren het luchtdebiet doorheen de uitlaatschacht. Deze ventilatoren met registratie kunnen ingezet worden ter bepaling van het ventilatiedebiet, mits deze aan de kalibratievoorwaarden voldoen beschreven zoals in 3.1. Minimaal de helft van elke set aan identieke ventilatoren met registratie (zelfde merk, type, leeftijd, onderhoudsstatus, grootte uitlaatschacht) dient gekalibreerd te worden met een gekalibreerde meetwaaier of met referentiemetingen volgens EN ISO 16911-1 (CEN, 2013) i. De kalibratie gebeurt over de volledige range van het toegepaste ventilatiedebiet in de stal.

Het gebruik van een ventilator met registratie, maakt gebruik van de apparatuur aanwezig in de stal en vereist geen installatie van bijvoorbeeld een extra meetwaaier in de stal. Opdat dit een relatieve nieuwe methode is, is deze tot nog toe weinig toegepast. Goselink *et al.* (2022) en Linke *et al.* (2023) pasten deze methode toe ter bepaling van het ventilatiedebiet in kippenstallen in Nederland en Duitsland respectievelijk (Goselink *et al.*, 2022; Linke *et al.*, 2023).

3.3 ANEMOMETER/WINDMETER

Ook anemometers kunnen worden toegepast ter bepaling van het ventilatiedebiet in een stal. Een anemometer of windmeter is een meetinstrument om zowel de windsnelheid als de windrichting te bepalen. Anemometers worden op periodieke meetpunten aan openingen van een stal geplaatst (vb. de in- en/of uitlaat opening(en) van een natuurlijk geventileerde stal). Door de windsnelheidsvector die loodrecht op een meetpunt van de opening binnenkomt te bepalen en deze te interpoleren met het oppervlakte van deze opening, kan het ventilatiedebiet doorheen de opening bepaald worden. De windrichting vertelt hoe de lucht zich doorheen de stal verplaatst en onderscheid de inlaat van de uitlaat. De integratie van alle in- of uitlaten resulteert in het totale ventilatiedebiet van de stal (Hassouna *et al.*, 2022).

Er bestaan verschillende anemometers, elk berustend op een ander principe. **Hittedraad anemometers** linken het verlies aan warmte van een dunne verwarmde draad aan de gassnelheid (Mosquera *et al.*, 2014; Mosquera *et al.*, 2002). Hittedraad anemometers zijn kwetsbaar en deze methode is gevoelig aan stof dat op de verwarmde draad kan ophopen.

Ultrasone anemometers meten de luchtstroom door het tijdsverschil te detecteren die een ultrasone puls nodig heeft om zich te verplaatsen tussen een paar omvormers (Ozcan, 2011; Van

Overbeke *et al.*, 2016). Ultrasonische sensoren zijn robuust en meten rechtstreeks de luchtsnelheid alsook de richting van de luchtverplaatsing. Van Overbeke *et al.* (2016) en Joo *et al.* (2015) illustreerden de applicatie van ultrasonische anemometers ter bepaling van het ventilatiedebiet in natuurlijk geventileerde melkveestallen (Joo *et al.*, 2015; Van Overbeke *et al.*, 2016).

Bij een **laser Doppler anemometer** wordt laserlicht opgesplitst in twee lichtstralen waarvan één wordt uitgezonden. Partikels zwevend in de luchtstroom zullen het licht terugkaatsen naar een detector. Het teruggekaatste licht wordt vergeleken met de originele lichtstraal. Wanneer partikels snel door de lucht zweven veroorzaakt dit een Doppler shift in het teruggekaatste laserlicht. Deze shift wordt gebruikt ter bepaling van de luchtsnelheid. Janke *et al.* (2020b) illustreerden het gebruik van een laser Doppler anemometer ter bepaling van het ventilatiedebiet in natuurlijk geventileerde melkveestallen.

Anemometers laten een directe bepaling toe van het ventilatiedebiet. Een groot voordeel aan deze methode is de mogelijkheid tot zelf-controle: de hoeveelheid lucht die de stal binnenkomt zou in principe gelijk moeten zijn aan de hoeveelheid lucht die de stal verlaat. Het verschil tussen de lucht in- en uitstroom geeft de accuraatheid voor deze methode weer (Hassouna *et al.*, 2023a). Dit verschil kan oplopen als gevolg van de interpolatie van een meetpunt naar de volledige opening in het ventilatievlak of door het niet kunnen bemeten van openingen die een significante rol spelen als in- of uitlaat. Voorbeelden van niet-bemeetbare openingen in stallen zijn voerhekken aan de buitenzijden van de stal, uitlaat aan de nok of openingen waar de doorgang voor landbouwer of machines noodzakelijk is. Ook de bepaling van het aantal meetpunten en positie van de meetpunten is cruciaal, zoals Janke *et al.* (2020a) illustreert (Janke *et al.*, 2020). Dit maakt het gebruik van anemometers voor de bepaling van het ventilatiedebiet complex, en de kostprijs kan hoog oplopen. Het toepassen en optimaal gebruik van anemometers voor de bepaling van het ventilatiedebiet in veestallen is op dit ogenblik nog in volle ontwikkeling en focust op natuurlijk geventileerde stallen (Hassouna *et al.*, 2023b; Hassouna *et al.*, 2016; Janke *et al.*, 2022; Janke *et al.*, 2020; Joo *et al.*, 2015; Mosquera *et al.*, 2014; Mosquera *et al.*, 2002; Van Overbeke *et al.*, 2016).

3.4 TRACERGAS RATIO METHODE

Naast de bovengenoemde directe methodes, zijn meerdere indirecte methodes beschreven voor de bepaling van het ventilatiedebiet. Eén van deze indirecte methodes is de tracergas ratio methode. Hierbij wordt de concentratie van een extra gas (met name het tracergas) bepaald naast de concentratie van het doelgas (een pollutant gas, zoals ammoniak) (Hassouna *et al.*, 2016). Tracergassen zijn goed meetbare, niet-toxische en stabiele gassen (Mosquera *et al.*, 2002). Ze zijn inert en reageren niet met andere aanwezige gassen binnen de stal (VERA, 2018b). Dit tracergas

kan artificieel in de stal worden geïntroduceerd (vb. SF₆, C₄H₈ (isobutyleen), Krypton⁸⁵, SF₅CF₃, CF₄)v of reeds metabolisch aanwezig zijn in de stal (vb. CO₂, N₂O) (KTBL, 2013a; Mosquera *et al.*, 2002; VERA, 2018b). De methode veronderstelt dat het tracergas in de stal wordt aangevoerd met een constante luchtstroom en dat het tracergas zich verspreid zoals het doelgas met een uniforme distributie binnen de stal (Hassouna *et al.*, 2016; Mosquera *et al.*, 2002).

Door bepaling van de tracergas concentratie die de stal binnenkomt en verlaat, en de bepaling van de snelheid van injectie (artificieel tracergas) of productie (aanwezig tracergas) van het gas kan een massabalans van het tracergas worden opgemaakt (VERA, 2018b). Omdat de tracergasconcentratie die de stal verlaat zal afhangen van het ventilatiedebiet, kan via de massabalans het ventilatiedebiet worden berekend via onderstaande vergelijking (vergelijking 3.3.1) (Hassouna *et al.*, 2016).

$$V = \frac{\text{prod}(\text{gas}) - \text{Vol} * \frac{[\text{gas}]IN(t1) - [\text{gas}]UIT(t0)}{t1 - t0}}{[\text{gas}]IN(t1) - [\text{gas}]UIT(t1)} \quad 3.3.1$$

Met

V = ventilatiesnelheid (m³s⁻¹)

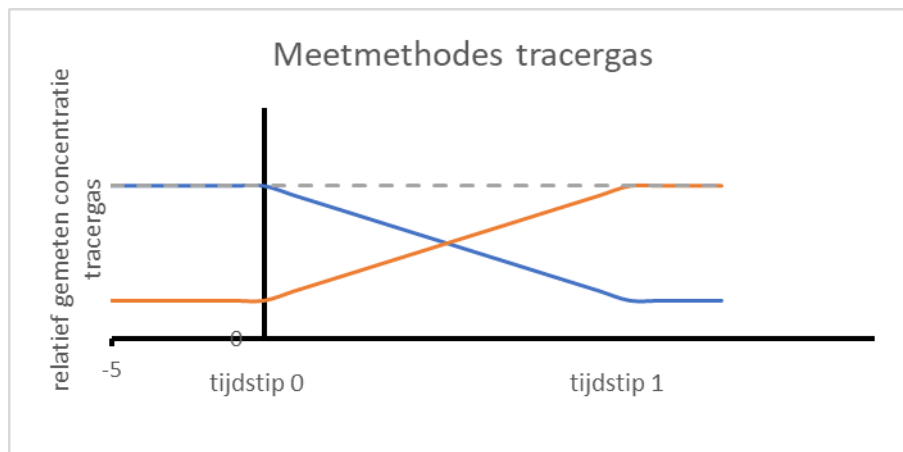
prod(gas) = injectiesnelheid + productiesnelheid van het tracergas (ml s⁻¹)

Vol = Luchtvolume binnen de stal (m³)

[gas]IN(t1) = binnen-concentratie van het tracergas op tijdstip (t1) (ml m⁻³)

[gas]UIT(t1), (t0) = buiten-concentratie van het tracergas op tijdstip (t1) en (t0) (ml m⁻³)

Er zijn drie gangbare tracergas ratio methodes (Figuur 3.1) (Ogink *et al.*, 2013b). Bij de 'rate of diffusion' methode zal de concentratie tracergas worden opgedreven tot een goed meetbare concentratie, waarna het ventileren van de stal aanvangt (tijdstip 0). Als gevolg van de ventilatie zal de tracergas concentratie in de stal dalen. Op basis van het verval in tracergas concentratie (tijdstip 1) wordt het ventilatiedebiet afgeleid. Bij de 'rate of accumulation' methode wordt de ventilatie gestart vooraleer tracergas in de stal wordt geïntroduceerd (tijdstip 0). De concentratie aan tracergas zal toenemen tot een evenwicht bereikt is (tijdstip 1). Deze toename zal afhangen van het ventilatiedebiet. Elk van deze methodes leveren een momentopname van het ventilatiedebiet. Een laatste methode, de 'continue methode' houdt de tracergas concentratie constant door de aanvoer van het tracergas continu bij te sturen. Uit deze bijsturing kan het ventilatiedebiet continu worden afgeleid (Mosquera *et al.*, 2002). De continue methode is de meest gebruikte tracergas methode (VERA, 2018b).



Figuur 3.1 Het verschil in gemeten tracergas concentratie doorheen de tijd. De gemeten tracergas concentratie hangt af van de toegepaste methode (rate of diffusion: blauwe curve, rate of accumulation: oranje curve, en de continue methode: stippellijn).

Er bestaan geïntegreerde systemen die het tracergas injecteren, luchtstalen nemen en de concentraties van het tracergas op verschillende tijdstippen bepalen om zo het ventilatiedebiet te berekenen. De tracergas ratio methode ter bepaling van het ventilatiedebiet kan worden toegepast voor alle staltypes die volledig of gedeeltelijk gesloten zijn (gesloten langs drie van de vier zijden of met een windscherm) (Hassouna *et al.*, 2016).

Verschillende studies pasten een tracergas ratio methode toe ter bepaling van het ventilatiedebiet voor mechanisch en natuurlijk geventileerde stallen (onder meer (Ikeguchi & Moriyama, 2010; Ogink *et al.*, 2017; Romanini *et al.*, 2013; Samer *et al.*, 2012; Schrade *et al.*, 2018; Vechi *et al.*, 2022)). Ook werd de tracergas ratio methode gebruikt voor de bepaling van het ventilatiedebiet voor een beperkt oppervlak van een stal (e.g. oppervlak met uitloop, oppervlak met mestopslag (Hassouna *et al.*, 2023a)).

Een nadeel bij het gebruik van tracergas zijn de ingewikkelde vergelijkingen om emissies te berekenen (VERA, 2018b). De concentraties van zowel het tracergas als het doelgas die de stal binnenkomen en verlaten moeten accuraat gemeten worden opdat de berekende emissies betrouwbaar zouden zijn (Korevaar & Winkel, 2022; Mosquera *et al.*, 2014). Een literatuurstudie waarbij de tracergas ratio methode werd toegepast zowel op grote schaal (veestallen) als op kleinere schaal (ventilatieschacht) gaven een meetonzekerheid die varieerde tussen 8 -35 % afhankelijk van de toepassing (Ozcan, 2011). Om een uniforme gasdistributie te garanderen, moet de luchtstroom op verschillende plaatsen in de stal gemeten worden via bepaling van de tracergas concentratie (Hassouna *et al.*, 2016).

Daarnaast kennen de meeste toegestane tracergassen een enorm broeikaseffect. Dit effect is voor SF₅CF₃ 18 000 keer hoger, en voor SF₆ 23 000 keer hoger dan de impact van CO₂ op de klimaatopwarming (Suen, 2008). Omwille van deze reden verbiedt Denemarken het gebruik van SF₆ als tracergas (VERA, 2018b). Een ander toegestaan tracergas is Krypton-85, een radioactief isotoop met een middellange radioactieve levensduur (de halveringstijd is 11 jaar). Omdat de concentratie aan Krypton-85 sterk toeneemt in de atmosfeer als gevolg van antropogene activiteiten, wordt ook dit gas gezien als een gas met een mogelijke omgevingsimpact (Kong *et al.*, 2017). Daarom krijgt het gebruik van natuurlijk aanwezige gassen als tracergas, zoals CO₂ (zie verder 3.4 CO₂-massabalans methode) in plaats van de introductie van artificiële tracergassen de voorkeur.

Tot slot is de toepasbaarheid van tracergassen ter bepaling van het ventilatiedebiet beperkt. In natuurlijk geventileerde stallen met grote ventilatieopeningen kan (door weersituaties) de luchtstroom die binnen komt en buiten gaat, sterk wisselen (Samer *et al.*, 2014). Wanneer hierdoor geen representatieve verhouding tussen het tracergas en het doelgas kan worden vastgesteld, kan een tracergas ratio methode niet gebruikt worden. Ook de nabijheid van andere stallen kunnen de luchtstroom verstoren, waardoor dit de ventilatiedebietbepaling via een tracergas bemoeilijkt (Ogink *et al.*, 2017).

**** Emissiebepaling met meetpunten rondom de stal***

Een recent overzicht van meetmethodes ter bepaling van emissies in natuurlijk geventileerde stallen, geeft aan dat het gebruik van de tracergas ratio methode ook anders kan (Hassouna et al., 2023a). In plaats van het tracergas te meten aan de uitlaat van de stal, wordt het tracergas gemeten in de omgeving rondom de stal. De dispersie pluim vanuit de stal van zowel het tracergas als het doelgas wordt in kaart gebracht, om via dispersiemodellen de concentratie en emissie te kunnen terugrekenen afkomstig uit de stal. Een mismatch tussen tracer- en doelgas zal zichtbaar zijn via continue metingen in de omgeving van de stal. Deze methode vereist echter de nodige kennis en expertise bij toepassing. Bij een correcte toepassing, toonden Fredenslund et al. (2019) een meetonzekerheid aan tussen 10-15% (Fredenslund et al., 2019). Belangrijk hierbij is dat mogelijke externe bronnen (naast de geïntroduceerde tracergas bron in de stal) mee in rekening gebracht worden (Scheutz & Kjeldsen, 2019). De voorkeur gaat naar een open landschap in de omgeving van de stal. Complexe landschappen met directe obstakels in de omgeving van de stal worden best vermeden omdat deze de emissiepluim vanuit de stal kunnen beïnvloeden (Flesch et al., 2005). Reeds enkele studies toonden CH₄ emissiemetingen aan via de tracergas dispersie modellering voor melkveebedrijven in een open landschap in Californië (Arndt et al., 2018; Daube

et al., 2019) of voor varkensbedrijven in Denemarken (Vechi *et al., 2022*). Andere studies bepaalden rechtstreeks emissies van het doelgas via dispersiemodellen zonder gebruik te maken van een tracergas. Dit gebeurde onder meer voor een varkenshouderij in een open vallei ten westen in de Verenigde Staten (Flesch *et al., 2005*), en een gesimuleerde melkveehouderij in Zwitserland (Bühler *et al., 2024*).

3.5 CO₂-MASSABALANS METHODE

De CO₂-massabalans methode kent hetzelfde principe als de tracergas ratio methode waarbij de concentratie van het metabolisch aanwezige gas CO₂ continu wordt bepaald als tracergas (Hassouna *et al., 2016*; Mosquera *et al., 2002*). Hierbij zijn de dieren de voornaamste CO₂-producenten. De CO₂-concentraties van de in- en uitgaande lucht worden gemeten aan de lucht in- en uitgang (Hassouna *et al., 2016*). Deze meetpunten zijn ver genoeg van obstakels of dieren waarbij een uniforme luchtstroom aan de in-en uitgang gegarandeerd wordt.

De methode berust op de wet van het behoud van CO₂-massa. Het ventilatiedebiet zal de relatie bepalen tussen de CO₂-productie in de stal en het verschil in CO₂-concentratie binnen en buiten de stal volgens onderstaande vergelijking (Hassouna *et al., 2016*) (Vergelijking 3.4.1).

$$V = \frac{CO_2(\text{productie})}{[CO_2]_{\text{uit}} - [CO_2]_{\text{in}}} \quad 3.4.1.$$

Met

V = ventilatiesnelheid (m³ h⁻¹)

CO₂(productie) = CO₂-productie afkomstig van de dieren, mest, en verwarmingsinstallatie (m³ CO₂ h⁻¹)

[CO₂] in = CO₂-concentratie van de ingaande lucht (m³ CO₂ m⁻³ lucht)

[CO₂] uit = CO₂-concentratie van de uitgaande lucht (m³ CO₂ m⁻³ lucht)

De CO₂-productie afkomstig van de dieren zal afhangen van de metabolische processen van de dieren. Hiervoor zijn rekenregels opgesteld door de International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering (CIGR) waarbij factoren zoals diergewicht, groei, productie, activiteit en voeropname- en samenstelling worden ingevuld (Hassouna *et al., 2016*; Mosquera *et al., 2002*; VERA, 2018b). In de berekeningen wordt ook een correctiefactor ingebracht die rekening houdt met mogelijke omgevingseffecten van de temperatuur en luchtvochtigheid in de stal. Hiervoor worden de temperatuur en luchtvochtigheid op minstens twee plaatsen in de stal geregistreerd tijdens de bepaling van de CO₂ concentraties.

Wanneer de mest in de stal accumuleert (bijvoorbeeld bij een diepe mestput), zal ook de CO₂-contributie van de mest in rekening moeten genomen worden (Calvet *et al.*, 2022; Pedersen *et al.*, 2008; VERA, 2018a). Voor stallen met drijfmest onder de stalvloer (mestput) is de CO₂-bijdrage uit de mest gering en wordt deze geschat op ~10 % (Pedersen *et al.*, 2008). Voor stallen met een strooisellaag kan de mest een variabele bron van CO₂ zijn (Wageningen UR Livestock Research, 2024). Om de strooisellaag als mogelijke CO₂-bron in rekening te brengen, worden meetkamers gebruikt om de CO₂-concentratie uit deze laag te bepalen (Calvet *et al.*, 2022; Sommer *et al.*, 2004). Deze meetkamer bestaat uit een afgesloten kubus met een enkele opening neerwaarts op het mestoppervlak. De CO₂ concentraties die in de meetkamer accumuleren worden gemeten. Om een totaalbeeld van de CO₂-bijdrage te kennen, is het aangeraden op verschillende plaatsen (minimaal 12) in de stal, en op verschillende dagen (minimaal 6) de CO₂ bijdrage van de mest te meten (Wageningen UR Livestock Research, 2024). Tot slot kan de contributie van de verwarmingsinstallatie afgeleid worden uit het energieverbruik van de stal.

Het toepassen van een CO₂-massabalans resulteert in een inschatting van het ventilatiedebiet uitgemiddeld over één dag. De CO₂-massabalans methode wordt veelvuldig toegepast om het ventilatiedebiet te bepalen in zowel natuurlijk als mechanisch geventileerde stallen (Konig *et al.*, 2018; Liang *et al.*, 2005; Mosquera *et al.*, 2022b; Ogink *et al.*, 2017; Romanini *et al.*, 2013; Schep *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2005). Desondanks wordt de accuraatheid van deze methode in vraag gesteld (Mosquera *et al.*, 2022b; Ogink *et al.*, 2013a; Schep *et al.*, 2022; Wu *et al.*, 2012). De CIGR rekenregels zijn niet altijd coherent. Aarnink *et al.* (2019) toonde aan via modelmatige inschatting en Ellen *et al.* (2015) via CO₂ berekeningen voor snelgroeiende vleeskuikens dat de CO₂ productie via de CIGR rekenregels overschat werd (Mosquera *et al.*, 2010b). Als alternatief kan een fundamenteel rekenmodel, zoals het Anipro model voor vleeskuikens worden gebruikt. In dit model worden factoren zoals voederopname en voedersamenstelling meegenomen, terwijl de CIGR rekenregels enkel rekening houden met het (metabool) gewicht van de dieren (Aarnink *et al.*, 2019).

De accuraatheid van de methode zal afhangen van een goeie registratie van de factoren die de CO₂ productie in de stal beïnvloed. Ook is de waarheidsgetrouwheid van de CIGR modellen die de metabolische processen van de dieren in kaart brengen van belang (Mosquera *et al.*, 2014; Mosquera *et al.*, 2002). De CO₂-massabalans zal afhangen van het gewicht, de productie en de zwangerschap van de dieren (Samer *et al.*, 2011b). De rekenregels en modellen opgelegd door CIGR dateren van 2002 (Sällvik & Pedersen, 2002). Omdat intussen de CO₂-productie per productie-eenheid (bijvoorbeeld vlees voor varkens en melk voor melkvee) sterk verlaagd is via genetische selectie (anno 2020: (MacLeod *et al.*, 2019; Pryce & Bell, 2017)), kan de waarheidsgetrouwheid van de CIGR-rekenregels in vraag gesteld worden. Ook het inschatten van de contributie van de mest tot de

CO₂-productie in de stal is niet eenvoudig (Calvet *et al.*, 2022). Tot slot heeft de locatie van de CO₂-metingen binnen en buiten de stal een effect op de accuraatheid van het ventilatiedebiet (Wu *et al.*, 2012). Door een onnauwkeurige meting van de CO₂-concentratie en de tijdsafhankelijke variatie in CO₂-productie van de dieren kan de meetonzekerheid van deze methode oplopen tot 50 % (Mosquera *et al.*, 2002).

3.6 WARMTEBALANS METHODE

Naast CO₂ produceren de dieren in de stallen ook warmte, waardoor temperatuurverschillen ontstaan binnen en buiten de stal. Omdat de geproduceerde warmte onder meer via ventilatie wordt afgevoerd, zullen de ontstane temperatuurverschillen afhangen van de ventilatie (Mosquera *et al.*, 2002). De ventilatie verklaart de relatie tussen de warmteproductie en het temperatuurverschil binnen en buiten de stal (Hassouna *et al.*, 2016).

Bij de warmtebalans methode wordt de winst aan warmte afkomstig van 1) de dieren, 2) het verwarmingssysteem en 3) de mest uitgebalanceerd ten opzichte van het verlies aan warmte door 1) waterverdamping, 2) behuizing van de stal en 3) ventilatie (Hassouna *et al.*, 2016; Mosquera *et al.*, 2002) (Vergelijking 3.5.1).

$$\text{warmte} - \text{verlies}(\text{waterverdamping}) = \text{verlies}(\text{behuizing}) + \text{verlies}(\text{ventilatie}) \quad 3.5.1.$$

Via warmte- en vochtigheidsmetingen en informatie over het stalgebruik en de aanwezige dieren kan de warmtebalans worden opgemaakt. Uit deze balans kan vervolgens het ventilatiedebiet worden afgeleid (Hassouna *et al.*, 2016). De warmteproductie van de dieren wordt afgeleid uit vooropgestelde modellen (zoals door CIGR) (Sällvik & Pedersen, 2002). De warmteproductie door het verwarmingssysteem wordt afgeleid door het meten van de binnentemperatuur. Het warmteverlies door de behuizing van de stal wordt afgeleid uit de thermale isolatie van het gebouw. Waterverdamping wordt nagegaan door bepaling van de relatieve luchtvochtigheid (Hassouna *et al.*, 2016; Mosquera *et al.*, 2002). De impact van mogelijk overige factoren wordt beschouwd als verwaarloosbaar, hoewel ook modellen bestaan voor het bepalen van de geproduceerde warmte uit mest (Hassouna *et al.*, 2016). Wanneer al deze factoren gekend of verwaarloosbaar zijn, kan het ventilatiedebiet als ongekende factor worden berekend via onderstaande vergelijking (vergelijking 3.5.2) (Hassouna *et al.*, 2016).

$$V = \frac{\text{warmte} - \text{verlies}(\text{behuizing})}{E(\text{in}) - E(\text{uit})} \quad 3.5.2.$$

Met

Warmte = winst aan warmte afkomstig van de dieren, mest en verwarmingssysteem (J h⁻¹)

Verlies = verlies aan warmte door waterverdamping of behuizing (J h⁻¹)

V = ventilatiesnelheid (m³h⁻¹)

E(in) = Energie inhoud in de binnenlucht (J m⁻³)

E(uit) = Energie inhoud in de buitenlucht (J m⁻³)

Wanneer dieren de grootste bijdrage leveren tot warmteproductie, is de inschatting van het ventilatiedebiet via de warmtebalans gelijkaardig aan deze via de CO₂-massabalans methode (Hassouna *et al.*, 2016). Het is een eenvoudige en reproduceerbare methode (Hassouna *et al.*, 2016; Mosquera *et al.*, 2002). Wanneer de warmteverschillen binnen en buiten de stal te klein zijn, kan de warmtebalans echter niet opgemaakt worden. De nauwkeurigheid van deze methode hangt af van hoe gedetailleerd de warmtebalans is opgesteld (Mosquera *et al.*, 2014). De modellen voor warmteproductie door de aanwezige dieren moeten representatief zijn. Daarnaast kunnen ook andere factoren (leeftijd, activiteit, aan/afwezigheid en voederconsumptie van de dieren) een impact hebben op de warmteproductie en die worden niet altijd in rekening gebracht (Hassouna *et al.*, 2016)

In verschillende studies is deze methode toegepast voor zowel mechanisch als natuurlijk geventileerde stallen voor verschillende diercategorieën (onder meer (Pedersen & X, 2004; Romanini *et al.*, 2013; Samer & Abuarab, 2014; Samer *et al.*, 2011b)). Exacte meetwaarden van het ventilatiedebiet over kortere tijdsperiodes (< 24 uur) zijn met een warmtebalans methode onmogelijk (Hassouna *et al.*, 2016).

3.7 Vochtigheidsbalans methode

De vochtigheidsbalans methode steunt op eenzelfde principe als de warmtebalans methode (zie 3.5). Naast een warmtebron, zijn de dieren in de stal een bron van waterdamp (H₂O) in de lucht als resultaat van hun natuurlijke respiratie. De vochtigheid geproduceerd door de dieren is berekenend op basis van vooropgestelde modellen (zoals door CIGR) (Samer *et al.*, 2012). Daarnaast dragen het voeder en de mestput door evaporatie ook bij aan het vochtgehalte in de stal. De ventilatie verklaart de relatie tussen de toename in luchtvochtigheid en het verschil in

luchtvochtigheid binnen en buiten de stal. Bij de vochtigheidsbalans methode wordt de balans opgemaakt voor een gemeten concentratie aan water (H₂O) (vergelijking 3.6.1).

$$V = \frac{V_{air} * (vochtigheid - verlies(behuizing))}{W(in) - W(uit)} \quad 3.6.1.$$

Met

V_{air} = specifieke luchtvolume (m³ g(H₂O)⁻¹)

vochtigheid = winst aan vochtigheid afkomstig van de dieren, mestput en voeder (g(H₂O) h⁻¹)

Verlies = verlies aan vochtigheid door waterverdamping of behuizing (g(H₂O) h⁻¹)

V = ventilatiesnelheid (m³h⁻¹)

W(in) = Gemeten vochtigheid in de binnenlucht (g(H₂O) kg(droge lucht)⁻¹)

W(uit) = Gemeten vochtigheid in de buitenlucht (g(H₂O) kg(droge lucht)⁻¹)

De schatting van het ventilatiedebiet via de vochtigheidsbalans methode is afhankelijk van hoe representatief de modellen voor respiratie en evaporatie zijn. De vochtigheidsbalans methode werd slechts sporadisch toegepast ter bepaling van het ventilatiedebiet (Blanes & Pedersen, 2005; Hassouna *et al.*, 2016; Samer *et al.*, 2012).

4 TOEGESTANE MEETMETHODES IN (INTER)NATIONALE MEETPROTOCOLLEN

Er zijn verschillende (inter)nationale meetprotocollen die het toepassen van specifieke meetmethodes ter bepaling van emissies uit veestallen beschrijven. Hoewel het aanbod aan meetmethodes voor de bepaling van het ventilatiedebiet in de wetenschappelijke literatuur groot is, worden niet alle meetmethodes aanvaard in deze meetprotocollen. Tabel 4.1. geeft een overzicht van de **huidig erkende meetmethodes** voor verschillende Europese regio's. Enkel meetmethodes die momenteel gelden **voor officiële emissiemetingen en bepaling van emissiefactoren, zijn in de tabel opgenomen**. De (al dan niet officieel) toegestane meetmethodes worden hieronder per Europese regio toegelicht.

Tabel 4.1: Overzicht van de referentiemethode volgens VERA en de toegestane meetmethodes in meerdere Europese regio's voor het bepalen van het ventilatiedebiet in een stal voor officiële emissiemetingen.

Meetmethode	VERA	Denemarken	Duitsland	Nederland	Vlaanderen
Meetwaaier	X	X	X VDI 4219	X	X
Tracergas ratio methode	X	X	EN ISO 12569:2017	X	
CO ₂ -massabalans methode	X	X	X	X	
Ventilator met registratie			X	X	

4.1 VERA

VERA (Verification of Environmental Technologies for Agricultural Production) was een internationale samenwerking tussen Denemarken, Nederland en Vlaanderen voor het testen en verifiëren van milieutechnologieën in de landbouwsector en werd opgericht in 2008 (VERA, 2021). Zwitserland was een gastland van VERA. Duitsland beëindigde hun lidmaatschap recent (2021) en daarna werd in 2022 verdere samenwerking opgedoekt. VERA werkte als onafhankelijke organisatie voor verificatie van prestaties en operationele stabiliteit van milieutechnologieën. Deze verificatie gebeurde door middel van protocollen.

VERA beschikt over een protocol voor de bepaling van emissies uit stallen inclusief toegestane meetmethodes ter bepaling van het ventilatiedebiet (Tabel 4.1). De door VERA geaccepteerde methodes staan beschreven in het BREF (Best Available Techniques Reference Document) van de

Europese Commissie (Giner Santonja *et al.*, 2017). Het protocol stelt een referentiemethode voorop, afhankelijk van de ventilatie aanwezig in de stallen.

Voor mechanisch geventileerde stallen is het gebruik van een meetwaaier ("fanwheel anemometer") de referentiemethode. VERA eist dat alle gebruikte meetwaaiers correct gekalibreerd zijn volgens EN ISO 17025:2017 en ook jaarlijks gekalibreerd worden. Daarnaast is ook de tracergas ratio methode en CO₂-massabalans methode in mechanisch geventileerde stallen toegestaan.

Voor natuurlijk geventileerde stallen is de tracergas ratio methode de referentiemethode. Het protocol geeft als mogelijke artificiële tracergassen zwavelhexafluoride (SF₆), Krypton-85 (⁸⁵Kr) en Trifluoromethyl sulfur pentafluoride (SF₅CF₃) met als kanttekening dat SF₆ een sterk broeikasgas is en daarom verboden in Denemarken. Als natuurlijk tracergas wordt CO₂ opgegeven, wat neerkomt op de CO₂-massabalans methode. De concentraties tracergas/CO₂ die de stal binnenkomen en verlaten worden bepaald via gas chromatografie (GC) (en specifiek met een Electron-Capture Detector (GC-ECD) voor SF₆ en Thermoconductiviteitsdetector (GC-TCD) voor CO₂). Als rekenregels worden deze van de International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering (CIGR) gehanteerd. Het protocol geeft aanbevelingen voor het aantal meetpunten en het plaatsen van meetpunten ter bepaling van de (tracer)gas concentraties binnen en buiten de stal, alsook voor het plaatsen van injectiepunten voor artificiële tracergassen.

4.2 DENEMARKEN

Het MEL (Miljøstyrelsens Referencelaboratorium for Måling af Emissioner til Luften, Brøndby, Denemarken) beheert de nationaal erkende meetprotocollen in Denemarken. MEL-25 (2020) beschrijft een protocol voor de bepaling van het ventilatiedebiet, met verwijzing naar de normen EN ISO 16911-1:2013 en aanvullend CEN/TR 17078. In dit protocol staan de methode met meetwaaier en tracergas ratio methode beschreven. Het protocol specificeert echter niet de toepassing van dit protocol ter bepaling van het ventilatiedebiet voor emissiemetingen in veestallen (MEL, 2020).

Ter bepaling van het ventilatiedebiet voor emissiemetingen volgt Denemarken wat het VERA protocol aangeeft: voor mechanisch geventileerde stallen wordt een meetwaaier gebruikt ("fanwheel anemometer"), voor een natuurlijk geventileerde stal wordt de CO₂-massabalans methode toegepast. Afwijking van het VERA protocol is toegestaan, mits goedkeuring door een nationaal experten team (persoonlijke communicatie Kirstoffer Jonassen, Ministerie van Omgeving Denemarken, februari 2022).

4.3 DUITSLAND

Het KTBL (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.) is een geregistreerde Duitse vereniging ondersteund door het Duitse Federale Ministerie van Voedsel en Landbouw (BMEL). Zij lanceerden een project (EmiDaT, Ermittlung von Emissionsdaten für die Beurteilung der Umwelt-wirkungen der Nutztierhaltung 2014-2022) om een standaard meetprotocol te valideren voor de bepaling van emissies binnen de veehouderij (Eurich-Menden *et al.*, 2021). Het project maakte een overzicht van verschillende methodes toegepast in Duitse studies. Voor natuurlijk geventileerde stallen wordt verwezen naar de tracergas ratio, CO₂-massabalans, warmtebalans en vochtigheidsbalans methode (KTBL, 2013a). Voor mechanisch geventileerde stallen wordt verwezen naar meetwaaiers zoals voorgeschreven in het protocol (VDI 4219) door de associatie van Duitse Ingenieurs (Verein Deutscher Ingenieure, VDI) (KTBL, 2013b; VDI, 2011). Binnen het vervolgproject (EmiMin, EmissionsMinderung Nutztierhaltung, 2018-2024) op EmiDaT wordt ook een ventilator met registratie toegepast ter bepaling van het ventilatiedebiet.

Ter bepaling van het ventilatiedebiet worden de methodes toegepast in de EmiDaT en EmiMin projecten erkent als nationale standaard (<https://www.ktbl.de/themen/emissionstagung>). Voor mechanisch geventileerde stallen zijn dit het gebruik van een meetwaaier zoals beschreven in het VERA protocol of beschreven door de VDI (VDI 4219) of is een klimaatcomputer mits kalibratie toegestaan. Voor natuurlijk geventileerde stallen zijn het gebruik van de CO₂ massabalans methode of de tracergasratio methode toegestaan (persoonlijke communicatie David Janke, ATB, Potsdam, april 2024. Hij is betrokken bij het EmiMin project).

4.4 FRANKRIJK

Een studie van het RMT (Réseau Mixte Technologique, Elevage et Environnement) en ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) lijstte meetmethodes op voor de bepaling van het ventilatiedebiet die toegepast zijn in Frankrijk (Hassouna *et al.*, 2016). Deze lijst bevatte het gebruik van een meetwaaier, de CO₂-massabalans-, warmtebalans- en tracergas ratio methode. Deze meetmethodes zijn ook erkend door andere Europese landen. Frankrijk kent echter geen regelgeving voor het bepalen van emissiemetingen in stallen. Bijgevolg is een nationaal protocol voor de bepaling van emissies in stallen (en dus het bepalen van het ventilatiedebiet) onbestaande in Frankrijk (persoonlijke communicatie Melynda Hassouna, januari 2022).

4.5 NEDERLAND

Nederland beschikt recent (januari 2024) over richtlijnen met toegestane meetmethodes voor de bepaling van het ventilatiedebiet (veehouderij, 2024). Analoog aan het VERA protocol zijn dit het gebruik van een meetwaaier, CO₂-massabalans methode en tracergas ratio methode. Daarnaast is ook het gebruik van een ventilator met registratie toegestaan, mits kalibratie van deze ventilator. Meerdere rapporten van de Wageningen Livestock Research beschrijven een protocol ter bepaling van specifieke emissies. Deze rapporten omvatten allemaal eenzelfde protocol ter bepaling van het ventilatiedebiet (Groenestein *et al.*, 2011; Mosquera *et al.*, 2011; Ogink *et al.*, 2017; Ogink, 2011; Ogink *et al.*, 2011). Het toepassen van een ventilator met registratie werd voorlopig slechts eenmalig toegepast in Nederland in een pluimveestal (Goselink *et al.*, 2022).

4.6 VLAANDEREN

Het Vlaams rapport (2001) voor het ontwikkelen van een procedure voor de bepaling van ammoniakemissies rapporteert een meetmethode via meetwaaiers om het ventilatiedebiet in een mechanisch geventileerde stal te bepalen (Hendriks *et al.*, 2001). Voor natuurlijk geventileerde stallen stelt het rapport dat een betrouwbare meettechniek om het ventilatiedebiet te bepalen ontbreekt. Weliswaar staan de tracergas ratio methode, de CO₂-massabalans methode en de warmtebalans methode opgelijst als mogelijkheden, maar deze meetmethodes waren toen niet erkend binnen de toenmalige meetstandaard.

Het ministerieel besluit van 19 maart 2004 beschrijft een lijst van ammoniakemissiearme stalsystemen (Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, 2004). Bijlage II van dit besluit beschrijft de meetprocedure om een stalsysteem op te nemen in de lijst van ammoniakemissiearme stalsystemen. Hierin staan erkende meetmethodes voor het bepalen van het ventilatiedebiet en de uiteindelijke ammoniakemissie. Deze methodes zijn gebaseerd op het hierboven vermelde Vlaams rapport daterend van 2001. Het besluit erkent enkel een meetmethode voor mechanisch geventileerde stallen, met name het gebruik van een meetwaaier (Hendriks *et al.*, 2001).

Het ministerieel besluit van 16 juli 2021 voorziet een herziening van bijlage II voor de procedure voor de opname van stalsystemen in de lijst van ammoniakemissie-arme stalsystemen (Vlaamse Regering, 2021). De meetprocedure beschreven in het ministerieel besluit van 19 maart 2004 is niet langer geldig. Het opstellen van nieuwe Vlaamse meetrichtlijnen voor de bepaling van de concentraties, het ventilatiedebiet en hieruit volgend de emissies zal door het Wetenschappelijk Comité Luchtemissies Veehouderij (WeComV) gebeuren. De meest recente informatie hierover is te vinden op de website van het WeComV: <https://wecomv.be/nl/meetrichtlijnen>.

4.7 DISCUSSIE

4.7.1 *Mechanisch geventileerde stallen*

Omdat het gebruik van een meetwaaier toelaat de luchtstroom rechtstreeks te meten, is dit de meest accurate methode ter bepaling van het ventilatiedebiet voor mechanisch geventileerde stallen (VERA, 2018). Calvet *et al.* (2010) bepaalde het ventilatiedebiet via meetwaaiers voor een vleeskippenstal. De auteurs vergeleken hun data met metingen voor vleeskippenstallen uit de literatuur en concludeerden dat directe metingen, zoals door het gebruik van een meetwaaier, accurater zijn ten opzichte van indirecte metingen (CO₂-massabalans of warmtebalans methode) uit de literatuur.

Het gebruik van een ventilator met registratie is eveneens een directe methode. De keuze voor deze methode ligt voor de hand, gezien meer en meer stallen uitgerust zijn met een ventilator die de luchtsnelheid bijhoudt om het stalklimaat te regelen. Echter is een correcte kalibratie van de ventilator hierbij cruciaal. Het aantal studies die deze methode tot nog toe toepasten is beperkt (Goselink *et al.*, 2022; Linke *et al.*, 2023).

Zou *et al.* (2020) vergeleek het gebruik van een meetwaaier (directe methode) met een CO₂-massabalans methode (indirecte methode) ter bepaling van het ventilatiedebiet. Twee mechanisch geventileerde melkveestallen op eenzelfde bedrijf werden uitgemeten. De CO₂-massabalans methode neigde het ventilatiedebiet wat te overschatten (8.3-13.4 %) ten opzichte van het gebruik van een meetwaaier. Algemeen kwamen de metingen en trends via beide methodes goed overeen, met een correlatie van $r = 0.93$ voor de 24-uursmetingen, de lineaire regressie tussen metingen met beide methodes kende een p -waarde = 0.014). Voor de 1-uursmetingen was de correlatie tussen beide meetmethodes $r = 0.85$, de lineaire regressie tussen metingen met beide methodes kende een p -waarde < 0.001. Ook andere auteurs bevestigen dat metingen via een CO₂-massabalans methode en een meetwaaier methode niet significant verschillen voor de bepaling van het ventilatiedebiet. Li *et al.* (2005) illustreerden dit voor een mechanisch geventileerde leghennenstal ($r = 0.98$ voor 24-uursmetingen (Li *et al.*, 2005), Nederlandse onderzoekers illustreerden dit voor pluimveestallen ($n = 23$) met een correlatie van $r = 0.96$ tussen beide methodes en voor varkensstallen ($n = 53$) met een correlatie schommelend tussen $r = 0.85-0.99$ afhankelijk van de dier-subcategorie (Mosquera *et al.*, 2010a). De voorwaarde is een nauwkeurige registratie van factoren zoals diergewicht, groei, productie, activiteit en voeropname- en samenstelling om de CO₂-productie via de CIGR rekenregels te bepalen. Estelles *et al.* (2010) kon echter geen correlatie bevestigen tussen beide methodes ($r = 0.62-0.74$ voor een mechanisch geventileerde konijnenhouderij. Het verschil tussen beide methodes liep op van 7 tot 27 % op het berekend ventilatiedebiet (Estelles *et al.*, 2010).

Pedersen *et al.* (1998) voerde een grootschalige meetcampagne uit om drie indirecte meetmethodes (warmtebalans, vochtigheidsbalans en CO₂-massabalans methode) met elkaar te vergelijken. Hier werden voornamelijk mechanisch geventileerde stallen uitgemeten. Voor meerdere stallen verspreid over Noord-Europa met verschillende diercategorieën (15 vleesvarkensstallen, 12 leghestallen en 12 melkveestallen, waarvan 4 natuurlijk geventileerd) werd het ventilatiedebiet (24 uursmeting) bepaald. Om de balansen op te maken, pasten de auteurs de CIGR-rekenregels toe. Hierbij werd voor de warmtebalans een onderscheid gemaakt in de warmteproductie afkomstig van dieren en mest en de warmteproductie als resultaat van waterverdamping. Voor de vochtigheidsbalans werd onderscheid gemaakt in de vochtigheid afkomstig door evaporatie en de relatieve vochtigheid in de stal. De meetwaarden voor het ventilatiedebiet kenden een goede correlatie tussen de CO₂ massabalans en de warmte/vochtigheidsbalans methoden voor vleesvarkens ($r = 0.82$ met p -waarde < 0.01), voor leghennen ($r = 0.95$ met p -waarde < 0.001) en melkvee ($r = 0.95$ met p -waarde < 0.001). De voorwaarde om het ventilatiedebiet volgens de indirecte methoden goed te schatten, is dat het verschil tussen de binnen – en buitenmetingen voldoende groot is (voor warmte een temperatuurverschil > 5 °C, voor vochtigheid een verschil $> 0.5 \cdot 10^{-3}$ kg m⁻³ en voor CO₂ concentratie een verschil > 200 ppm). Bij afwezigheid van dieren in de stal bijvoorbeeld, zullen de concentratieverschillen in CO₂, luchtvochtigheid of temperatuur te laag zijn, waardoor geen ventilatiedebiet kan worden bepaald.

Uit bovenvermelde publicaties blijkt dat **een tracergas ratio methode (CO₂-massabalans) een goed alternatief kan zijn ten opzichte van het gebruik van een meetwaaier om het ventilatiedebiet te bepalen in mechanisch geventileerde stallen**. Ook andere studies bevestigen dit (onder meer (Blanes & Pedersen, 2005; Mosquera *et al.*, 2022a; Mosquera *et al.*, 2022c; Xin *et al.*, 2009). Deze methode is volgens VERA en andere nationale protocollen dan ook toegelaten indien de directe methode met meetwaaiers niet toepasbaar is. Dit is het geval voor een stal met veel ventilatoren waarbij het onhaalbaar is om alle schachten van een meetwaaier te voorzien. Of in het geval de ventilatoren een diameter hebben die groter is dan 92 cm zoals vaak aanwezig in varkensstallen (provincie Limburg, 2015) en pluimveestallen (persoonlijke communicatie meetploeg Milieutechniek, Instituut voor Landbouw, Visserij en Voedingsonderzoek, februari 2023.)

4.7.2 *Natuurlijk geventileerde stallen*

Het gebruik van een meetwaaier of een ventilator met registratie ter bepaling van het ventilatiedebiet is onmogelijk in natuurlijk geventileerde stallen omwille van de grote lucht in- en uitlaat openingen in de stal. Bijgevolg zijn andere methodes aangewezen (Hassouna *et al.*, 2023a; Hassouna *et al.*, 2016; Wageningen UR Livestock Research, 2024). Verschillende internationale (VERA) en nationale (Nederland (Ogink *et al.*, 2017), Duitsland en Denemarken) protocollen

verwijzen naar de tracergas ratio / CO₂-massabalans methode als referentie ter bepaling van het ventilatiedebiet voor natuurlijk geventileerde stallen.

Zwitserse onderzoekers illustreerden een proof-of-concept ter bepaling het ventilatiedebiet van een natuurlijk geventileerde melkveestal via de tracergas ratio methode. Ze bepaalden het ventilatiedebiet van een natuurlijk geventileerde melkveestal door de introductie van het tracergas (SF₆ of SF₅CF₃) (Schrade *et al.*, 2018). De tracergassen werden gedoseerd in de stal verspreid vanaf de stalvloer. De metingen duurden drie dagen waarbij de grote openingen in de melkveestal continu gesloten bleven. De concentratie tracergas werd bepaald via verspreide puntmetingen op een hoogte van 2,5 m. De gemeten concentraties tracergas kwamen overeen met de voorspelde waarden aan de hand van de gekende geïntroduceerde tracergas-concentratie. Uit de gemeten tracergas-concentratie werd het ventilatiedebiet berekend.

Het continue sluiten van de grote openingen is echter geen praktijksituatie. Samer *et al.* (2011) toonden aan dat gesloten (in winterperiode) of open (in zomerperiode) schermopeningen invloed hadden op het bepalen van het ventilatiedebiet via de tracergas ratio en CO₂-massabalans methode (alook via de warmtebalans methode) (Samer *et al.*, 2011b). Metingen van het ventilatiedebiet tijdens de zomerperiode met open schermopeningen kwamen in grote lijn overeen wanneer de verschillende methoden vergeleken werden. Metingen van het ventilatiedebiet tijdens de wintermaanden kwamen niet overeen tussen de verschillende methoden en bleken onvoldoende. Bovendien kenden de metingen met alle toegepaste methodes een enorme variatie ten opzichte van elkaar.

De WLR (Wageningen Livestock Research) in Nederland paste de CO₂-massabalans methode toe bij verschillende praktijkstallen met langdurige metingen. Voor natuurlijk geventileerde geiten- (n=2) en koeienstallen (n=18) werd gedurende twee jaar het ventilatiedebiet bepaald op basis van de CO₂-massabalans methode (Mosquera *et al.*, 2022b; Schep *et al.*, 2022). De onderzoekers stellen dat **absolute emissieniveaus nog niet betrouwbaar gemeten kunnen worden voor natuurlijk geventileerde stallen via de CO₂-massabalans methode bij kleine CO₂-concentratieverschillen binnen en buiten de stal. Een voorbeeld met kleine concentratieverschillen binnen en buiten de stal is weidegang.** De dieren zijn afwezig in de stal, en dus ook de CO₂ producenten. Hoe kleiner dit verschil, hoe groter het berekend ventilatiedebiet en dus hoe groter de berekende emissie. Voor CO₂-sensoren ingezet ter bepaling van het ventilatiedebiet bij natuurlijke ventilatie moeten dus hoge eisen (o.a. naar accuraatheid) worden gesteld aan de kwaliteit van de metingen. Ook een uniforme staalname van het CO₂-gas in de stal is vereist. Bij een niet-uniforme staalname van CO₂ in de stallucht, kunnen concentratieverschillen in de stal leiden tot een ander berekend ventilatiedebiet.

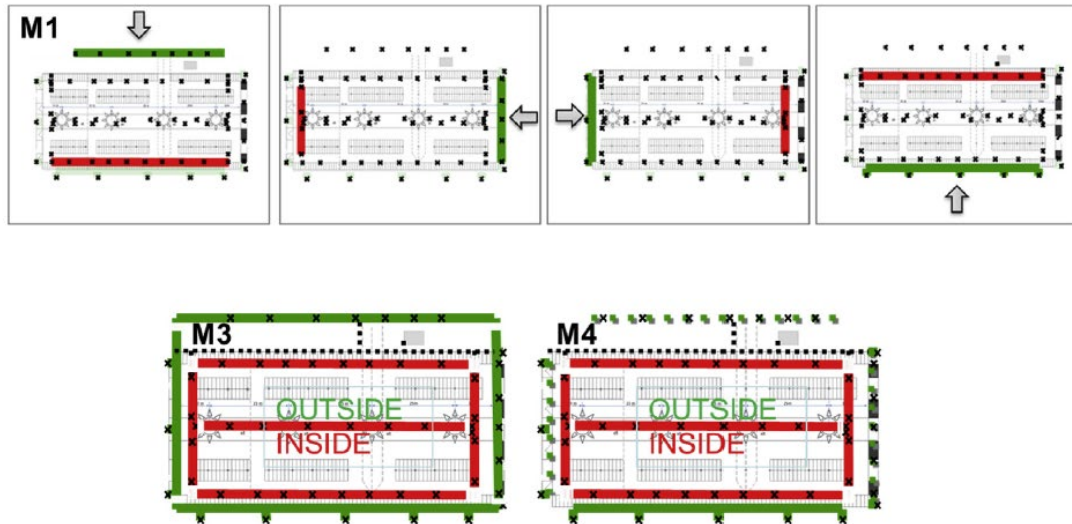
Ook een eerdere Nederlandse studie gaf aan dat de betrouwbaarheid van de bepaling van het ventilatiedebiet met indirecte methodes af hangt van hoe goed het verschil in tracergas, CO₂-concentratie, warmte of vochtigheid binnen en buiten de stal kan worden bepaald. Pedersen *et al.* (1998) gaf aan dat het verschil tussen de binnen – en buitenmetingen voldoende groot moet zijn (voor warmte een temperatuurverschil > 5 °C, voor vochtigheid een verschil > 0.5*10⁻³ kg m⁻³ en voor CO₂ concentratie een verschil > 200 ppm).

Om een uniforme staalname van CO₂ in de stallucht te garanderen, is de positie van de meetpunten en het aantal meetpunten cruciaal bij toepassing van de tracergas ratio / CO₂-massabalans methode. VERA geeft aanbevelingen, maar **een goede meetstrategie om het ventilatiedebiet accuraat te bepalen via de tracergas ratio/ CO₂-massabalans methode voor natuurlijk geventileerde stallen ontbreekt in de erkende protocollen** (Janke *et al.*, 2022; Janke *et al.*, 2020).

Verschillende studies illustreerden het belang van de positie van de meetpunten en aantal meetpunten. Zo illustreerde Van Buggenhout *et al.* (2009) dat de positie van het meetpunt in een testvolume van 9 m³, een afwijking tot 86 % ten opzichte van de gemeten CO₂ concentraties kan introduceren. Ook een studie van Konig *et al.* (2018) concludeerde dat concentratiemetingen van het tracergas voor één meetpunt afwijkingen tot 46% introduceren ten opzichte van een gemiddelde van acht meetpunten verspreid in een natuurlijk geventileerde melkveestal (Konig *et al.*, 2018). Tot slot gaf Edouard *et al.* (2016) aan dat een gemiddelde gasconcentratie bepaald voor meerdere meetpunten over de gehele lengte van de stal via de CO₂-massabalans of SF₆-tracergasmethode, resulteert in een accurater ventilatiedebiet ten opzichte van één gemeten tracergasconcentratie in het midden van de stal (Edouard *et al.*, 2016).

Naast individuele meetpunten verspreid in de stal, kan een staalname van de stallucht ook verlopen door het gebruik van een verzamelleiding. Een verzamelleiding verzamelt lucht uit de stal op verschillende meetpunten in de stal volgens een uniforme verdeling. Janke *et al.* (2020) onderzocht verschillende meetstrategieën met meerdere verzamelleidingen voor toepassing van de CO₂-massabalans methode: hoeveel verzamelleidingen en welke meetposities van CO₂-concentraties binnen en buiten de stal nodig zijn ter bepaling van het ventilatiedebiet in een natuurlijk geventileerde melkveestal. Gedurende een volledig jaar werden CO₂-concentraties op meerdere locaties binnen en buiten de stal geregistreerd. **De studie adviseert een andere strategie afhankelijk van de windcondities** (Janke *et al.*, 2020). Bij stabiele windcondities zijn CO₂-metingen aan een enkele lucht-in- en -uitstroom, gecorreleerd aan de windrichting, voldoende om het concentratieverschil binnen en buiten te bepalen en dus de tracergas ratio / CO₂-massabalans op

te maken (zie Figuur 4.1 M1). Bij complexere windcondities zijn metingen rondom de stal en op meerdere punten in de stal aangewezen om de tracergas ratio / CO₂-concentratie binnen en buiten de stal te bepalen (zie Figuur 4.1 M3 en M4). Ook Samer *et al.* (2014) toonden aan dat het correct toepassen van een tracergas ratio methode afhangt van de windcondities.



Figuur 4.1: Herwerkte figuur vanuit Janke *et al.* 2020. Figuur duidt de meetpunten voor de CO₂-concentratie aan voor de lucht-instroom (groen) en lucht-uitstroom ter bepaling van het ventilatiedebiet. Bij stabiele windcondities zijn metingen gecorreleerd aan de windrichting voldoende (M1), bij complexe windcondities zijn metingen rondom rond de stal én in de stal noodzakelijk ter bepaling van het ventilatiedebiet (M3 en M4).

Meerdere studies vergeleken verschillende indirecte methodes ter bepaling van het ventilatiedebiet in natuurlijk geventileerde stallen. Een studie van Duitse onderzoekers bepaalde het ventilatiedebiet via de CO₂-massabalans methode en de tracergas ratio methode met ⁸⁵Kr als tracergas (Samer *et al.*, 2011a; Samer *et al.*, 2011c). Het ventilatiedebiet werd voor verschillende zomerperiodes (n=10, 2006-2010) gedurende twee weken bepaald voor een natuurlijk geventileerde melkveestal. Beide methodes toonden een sterke lineaire correlatie ($r = 0.82$, de lineaire regressie tussen metingen met beide methodes kende een p-waarde < 0.05), maar de tracergas ratio methode overschatte het ventilatiedebiet tot twee keer ten opzichte van de CO₂-massabalans methode (overschatting = 2.05). Ook Nederlandse onderzoekers toonden een correlatie aan tussen beide methodes ($r = 0.95$, p-waarde < 0.05) en tevens dat de tracergas ratio methode het ventilatiedebiet meer dan twee keer overschatte ten opzichte van de CO₂-massabalans methode (overschatting = 2.5). Deze Nederlandse studie gebeurde in 4 verschillende melkveestallen waar meerdere 24-uursmetingen vergeleken werden (n = 39) (Mosquera *et al.*, 2010a). De periode van metingen (zomer of winter) werd niet opgegeven. Voor de studie van Edouard *et al.* (2016) bleek de overschatting van het ventilatiedebiet met de SF₆-tracergas ratio methode ten opzichte van de CO₂-massabalans methode beperkter (overschatting = 1.12).

De overschatting van de tracergas ratio methode ten opzichte van de CO₂-massabalans methode in deze studies kan te wijten zijn aan het verschil in de distributie en injectie van het gas (CO₂ of tracergas) tussen beide methodes: CO₂ wordt geproduceerd door de aanwezige dieren, terwijl het tracergas vanaf een bepaald punt in de stal geïnjecteerd wordt (Edouard *et al.*, 2016; Mosquera *et al.*, 2010a; Samer *et al.*, 2011b). Een vervolgstudie door Duitse onderzoekers illustreerde dat de plaats van injectie en concentratiebepalingen van het tracergas om goeie inschattingen van het debiet te kunnen maken, afhangt van de luchtstroom die de stal binnen komt en verlaat (Samer *et al.*, 2014). Deze lucht in- en uitstroom is afhankelijk van de weersomstandigheden/windcondities. Ook latere studies bevestigen dit (Janke *et al.*, 2020).

Omdat de productie in tracergas rechtstreeks gemeten kan worden, en niet moet worden afgeleid uit rekenregels en modellen zoals voor de CO₂-productie, warmte of vochtigheid in de stal, kan het gebruik van een artificieel tracergas accuratere metingen geven ten opzichte van de overige methodes (Mosquera *et al.*, 2002; Samer *et al.*, 2014). Ook Samer *et al.* (2011b) concludeert dit. **Het gebruik van de tracergas ratio methode kent echter volgende voorwaarden:** 1) het inmengen van het tracergas in de stal is uniform en gebeurt onmiddellijk, 2) de stal bevat geen obstakels opdat een uniforme luchtstroom mogelijk is, 3) het volume van de stal is gekend en 4) factoren die de luchtstroom beïnvloeden blijven constant gedurende het uitvoeren van de methode (Liddament, 1996).

Naast indirecte methodes kunnen ook directe methodes worden toegepast in natuurlijk geventileerde stallen. Joo *et al.* (2014) onderzocht een directe methode ter bepaling van het ventilatiedebiet met behulp van ultrasone anemometers voor een melkveestal in Washington, Verenigde Staten. De anemometers werden geplaatst op eenzelfde hoogte aan alle buitenzijden van een melkveestal en eveneens in de nok van de stal. De anemometers registreerden de lucht in- en uitstroom gedurende een half jaar om zo het ventilatiedebiet te bepalen. De luchtstroming in de stal was consistent met de windrichting rondom de stal: lucht instromen werden gemeten waar de wind de stal binnenkwam, lucht uitstromen werden gemeten waar de wind de stal verliet.

De onderzoekers bekeken verschillende strategieën ter bepaling van het ventilatiedebiet. Elke strategie bestond uit een andere combinatie van posities van anemometers aan de lucht in- en uitstromen. Door de gemiddelde windsnelheid aan zowel de lucht in-als uitstroom te combineren per uur, kon een goede inschatting van het ventilatiedebiet gemaakt worden. Als alternatief bleek ook het meten van enkel de windsnelheid aan de lucht instroom representatief ter bepaling van het ventilatiedebiet. De bepaling van het ventilatiedebiet op basis van enkel de lucht-uitstroom raadden de auteurs af. De lucht uitstroom was 12 – 19 % lager ten opzichte van de lucht instroom gemeten in eenzelfde periode. Dit verschil werd verklaard doordat de lucht instroom een uniformere stroming kent ten opzichte van de lucht uitstroom: Obstakels in de stal verstoren de luchtstroming doorheen de stal waardoor deze niet uniform is wanneer deze de stal verlaat. Wanneer het ventilatiedebiet op basis van de uitstroom bepaald wordt, ligt deze 6-9.5 % lager dan wanneer het ventilatiedebiet bepaald wordt op basis van enkel de luchtinstroom, of een combinatie van de lucht in-en uitstroom (Joo *et al.*, 2014).

Een directe methode met behulp van anemometers voor de bepaling van het ventilatiedebiet in een natuurlijk geventileerde stal werd verder onderzocht door Janke *et al.* (2020). Een natuurlijk geventileerde stal werd op kleinere schaal nagebouwd, voorzien van anemometers en in een continue luchtstroom geplaatst. De Duitse onderzoekers toonden aan dat **het aantal anemometers en de positie van de anemometers belangrijk zijn bij de bepaling van het ventilatiedebiet**. Om een goede inschatting te krijgen van het ventilatiedebiet, is een verticaal profiel van de luchtstroom doorheen de opening noodzakelijk.

Janke *et al.* (2022) stelt **voorwaarden bij het gebruik van een directe meetmethode**. Ten eerste moeten de gemeten luchtsnelheden correleren met de windsnelheid opdat de metingen meetellen ter bepaling van het ventilatiedebiet. Ten tweede kennen de gemeten luchtsnelheden een lage dispersie. Pas wanneer de balans tussen in- en uitstroom voldoende is, en de lucht in- en uitstroom een hoge correlatie kennen, kan via deze methode het ventilatiedebiet bepaald worden.

Ook Vlaamse onderzoekers van ILVO illustreerden de mogelijkheid om correcte in- en uitstroom snelheden te bepalen aan de hand van 3D metingen via anemometers van de windsnelheden op schaalmodel (Van Overbeke *et al.*, 2015). Het transfereren van deze methode van schaalmodel naar een natuurlijk geventileerde praktijkstal bleek in 2016 nog te complex (De Vogeleer *et al.*, 2016). Ondertussen illustreerde verder intern onderzoek dat de bepaling van het ventilatiedebiet mogelijk is door gebruik van ultrasone anemometers die verschillende verticale profielen opmeten in de stalopeningen, in combinatie met ultrasone anemometers in de nok van de stal. Op dit ogenblik loopt een gezamenlijke studie waarbij ILVO en WUR op vier Vlaamse melkveestallen de door ILVO ontwikkelde directe methode en de indirecte CO₂-massabalans methode (volgens het Nederlandse protocol (Ogink *et al.*, 2017)) met elkaar vergelijken gedurende een jaar (Ogink, 2022). De eindresultaten van deze studie worden in de herfst van 2025 verwacht.

Twee recente studies vergeleken de indirecte CO₂-massabalans methode en de directe meetmethode met behulp van anemometers ter bepaling van het ventilatiedebiet. Hoewel Wang *et al.* (2016) geen significante verschillen zag tussen beide meetmethodes voor 24-uursmetingen, bleken voor 1-uursmetingen, gecorrigeerd voor de dagelijkse variatie in dierenactiviteit, de berekende ventilatiedebieten op basis van beide methoden significant verschillend. Wang *et al.* (2016) concludeerde dat de CO₂-massabalans methode een overschatting maakt van het ventilatiedebiet ten opzichte van de directe meetmethode (Wang *et al.*, 2016). De waargenomen windsnelheden hadden een invloed op dit verschil tussen beide methodes: hogere windsnelheden leidden tot een lager verschil tussen beide methodes. Daarnaast vergeleek Janke *et al.* (2022) beide methodes onder stabiele windcondities waarbij de luchtstroom langs één kant de stal binnenkwam en langs de tegenovergestelde kant de stal verliet. Onder stabiele windcondities toonden de onderzoekers een hoge correlatie aan ($r = 0.74-0.88$ met een p -waarde < 0.05) tussen beide meetmethodes gebaseerd op 1-uursmetingen (Janke *et al.*, 2022).

Uit bovenstaande literatuurréview blijkt dat toepassing van de tracergas ratio / CO₂ massabalans ter bepaling van het ventilatiedebiet in natuurlijk geventileerde stallen mogelijk is, zolang het concentratieverschil tussen binnen – en buitenmetingen voldoende groot is. Bij lage verschillen (bijvoorbeeld de afwezigheid van dieren in de stal door beweiding) blijken deze methodes onvoldoende. Bovendien is ook de meetstrategie, inclusief het aantal meetpunten, de positie van de meetpunten, de positie van de tracergasinjecties en het rekening houden met een al dan niet uniforme luchtstroming doorheen de stal, belangrijk. Verschillende studies schuiven in plaats daarvan een directe meetmethode naar voor op basis van metingen van de windsnelheden en windrichting aan de in- en uitstroom via anemometers. Ook hier is het aantal meetpunten, de

positie van de meetpunten en het rekening houden met een uniforme luchtstroming doorheen de stal belangrijk.

5 CONCLUSIE

De meetmethodes ter bepaling van het ventilatiedebiet toegepast in verschillende Europese landen, zijn ook de methodes geaccepteerd door VERA. De door VERA geaccepteerde methodes staan beschreven in het BREF (Best Available Techniques Reference Document) van de Europese Commissie (Giner Santonja *et al.*, 2017). Een uitzondering is het gebruik van ventilatoren met registratie die niet in VERA beschreven staat, gezien deze methode slechts recent (2022) werd toegepast, nadat het VERA verbond was opgeheven.

De toepasbaarheid van de methode zal afhangen van het stalsysteem. Voor een mechanisch geventileerde stal geniet het gebruik van een gekalibreerde meetwaaier de voorkeur. Daarnaast is het gebruik van een gekalibreerde ventilator met registratie mogelijk. De tracergas ratio / CO₂-massabalans methode biedt een evenwaardig alternatief indien meetwaaiers of ventilatoren met registratie niet toegepast kunnen worden.

Voor natuurlijk geventileerde stallen is de tracergas ratio / CO₂-massabalans methode erkend door VERA en verschillende Europese landen (Duitsland, Denemarken en Nederland). Nederlandse onderzoekers stellen dat de methode onvoldoende betrouwbaar is voor de bepaling van absolute emissies wanneer het verschil tussen binnen en buitenmetingen te klein is. Bovendien ontbreekt een correcte meetstrategie om het ventilatiedebiet via de tracergas ratio / CO₂-massabalans methode accuraat te bepalen. De meetstrategie is cruciaal ter bepaling van het aantal meetpunten en de meetlocaties. Tot slot hangt de meetstrategie af van de uniforme verdeling van het tracergas / CO₂ in de stal en wordt deze beïnvloed door de windcondities doorheen de stal.

Meerdere studies opteren voor een directe meetmethode ter bepaling van het ventilatiedebiet in natuurlijk geventileerde stallen. Hierbij worden de windsnelheden en de windrichting doorheen de stal in kaart gebracht via anemometers. Deze directe meetmethode zal verder op punt gesteld moeten worden voor deze breed toepasbaar kan worden.

6 REFERENTIES

- Aarnink, A., van Harn, J., & Bos, B. (2019). *Warmte- en CO₂ productie van trager groeiende vleeskuikens*.
- Arndt, C., Leytem, A. B., Hristov, A. N., Zavala-Araiza, D., Cativiela, J. P., Conley, S., Daube, C., Faloona, I., & Herndon, S. C. (2018). Short-term methane emissions from 2 dairy farms in California estimated by different measurement techniques and US Environmental Protection Agency inventory methodology: A case study. *Journal of Dairy Science*, *101*(12), 11461-11479. <https://doi.org/https://doi.org/10.3168/jds.2017-13881>
- Blanes, V., & Pedersen, S. (2005). Ventilation flow in pig houses measured and calculated by carbon dioxide, moisture and heat balance equations. *Biosystems Engineering*, *92*(4), 483-493. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.09.002>
- Borowski, S., Matusiak, K., Powalowski, S., Pielech-Przybylska, K., Makowski, K., Nowak, A., Rosowski, M., Komorowski, P., & Gutarowska, B. (2017). A novel microbial-mineral preparation for the removal of offensive odors from poultry manure. *International Biodeterioration & Biodegradation*, *119*, 299-308. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.10.042>
- Bühler, M., Häni, C., Neftel, A., Bühler, P., Ammann, C., & Kupper, T. (2024). Applicability of the inverse dispersion method to measure emissions from animal housings. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, *2024*, 1-16.
- Calvet, S., van Dooren, H. J. C., Ogink, N. W. M., & Mosquera, J. (2022). Measuring and assessing the role of deep litter to estimate the ventilation rate using the CO₂ mass balance method. *Biosystems Engineering*, *224*, 313-323. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.10.017>
- Casey, K. D., Gates, R. S., Wheeler, E. F., Zajackowski, J. L., Topper, P. A., Xin, H., & Liang, Y. (2003). Ammonia emissions from broiler houses in Kentucky during winter.
- CEN. (2013). EN ISO 16911-1:2013 Emissies van stationaire bronnen - Handmatige en geautomatiseerde bepaling van de stroomsnelheid en het debiet in afgaskanalen - Deel 1: Handmatige referentiemethode *Deel 1: Handmatige referentiemethode* (pp. 98). Geneva, Switzerland: EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION.
- Chai, L., Ni, J.-Q., Diehl, C., Kilic, I., Heber, A., Chen, Y., Cortus, E., Bogan, B., Lim, T., & Ramirez-Dorransoro, J.-C. (2012). Ventilation rates in large commercial layer hen houses with two-year continuous monitoring. *British Poultry Science*, *53*(1), 19-31.
- Daube, C., Conley, S., Faloona, I. C., Arndt, C., Yacovitch, T. I., Roscioli, J. R., & Herndon, S. C. (2019). Using the tracer flux ratio method with flight measurements to estimate dairy farm CH₄ emissions in central California. *Atmospheric Measurement Techniques*, *12*(4), 2085-2095.
- De Vogeleer, G., Van Overbeke, P., Brusselman, E., Mendes, L. B., Pieters, J. G., & Demeyer, P. (2016). Assessing airflow rates of a naturally ventilated test facility using a fast and simple algorithm supported by local air velocity measurements. *104*, 198-207. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.05.006>
- Edouard, N., Mosquera, J., van Dooren, H. J. C., Mendes, L. B., & Ogink, N. W. M. (2016). Comparison of CO₂- and SF₆- based tracer gas methods for the estimation of ventilation rates in a naturally ventilated dairy barn. *Biosystems Engineering*, *149*, 11-23. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.06.001>
- Estelles, F., Blumetto, O., Calvet, S., & Torres, A. G. (2010). Use of carbon dioxide balances to determine ventilation rates from fattening rabbits farms. XVIIth World Congress of the International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering (CIGR), Québec City, Canada.
- Flesch, T. K., Wilson, J. D., & Harper, L. A. (2005). Deducing ground-to-air emissions from observed trace gas concentrations: A field trial with wind disturbance. *Journal of Applied Meteorology*, *44*(4), 475-484. <https://doi.org/Doi 10.1175/Jam2214.1>

- Fredenslund, A. M., Rees-White, T. C., Beaven, R. P., Delre, A., Finlayson, A., Helmore, J., Allen, G., & Scheutz, C. (2019). Validation and error assessment of the mobile tracer gas dispersion method for measurement of fugitive emissions from area sources. *Waste Management, 83*, 68-78. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.10.036>
- Giner Santonja, G., Georgitzikis, K., Scalet, B. M., Montobbio, P., Roudier, S., & Sancho, L. D. (2017). *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Intensive Rearing of Poultry or Pigs*. {EUR 28674 EN}. http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/IRPP_Final_Draft_082015_bw.pdf
- Goselink, Y., Ellen, H., & Nijeboer, G. (2022). *Emissiemetingen ECO Zero stal - Onderzoek naar de emissies van ammoniak en fijnstof uit de ECO Zero stal en de reductie van deze emissies door de ECO Units*.
- Groenestein, C. M., Mosquera, J., & Ogink, N. W. M. (2011). *Protocol voor meting van methaanemissie uit huisvestingssystemen in de veehouderij 2010*.
- Hassouna, M., Amon, T., Arcidiacono, C., Bühler, M., Calvet, S., Demeyer, P., D'Urso, P. R., Estelles, F., Häni, C., Hempel, S., Janke, D., Kjosevski, M., Kupper, T., Mohn, J., Mosquera, J., Norton, T., Scheutz, C., Thygesen Vechi, N., Van Overbeke, P., & Schrade, S. (2023a). *Technology for environmentally friendly livestock production* (D. Berckmans & T. Norton, Eds.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-19730-7>
- Hassouna, M., Amon, T., Arcidiacono, C., Bühler, M., Calvet, S., Demeyer, P., D'Urso, P., Estellés, F., Häni, C., & Hempel, S. (2023b). Measuring Techniques for Ammonia and Greenhouse Gas Emissions from Naturally Ventilated Housings. *Technology for Environmentally Friendly Livestock Production, 23*.
- Hassouna, M., Amon, T. A., C. Bühler, M., Calvet, S., Demeyer, P., D'Urso, P. R., Estellés, F., Häni, C., Hempel, S., Janke, D., Kjosevski, M., Kupper, T., Mohn, J., Mosquera, J. N., T., Scheutz, C., Thygesen, Vechi, Van, & Overbeke, P. S., S. (2022). Chapter 3: Measuring Techniques for Ammonia and GHG Emissions from Naturally Ventilted Housings. In *Technology for environmentally friendly livestock production*.
- Hassouna, M., Eglin, T., Cellier, P., Colomb, V., Cohan, J.-P., Decuq, C., Delabuis, M., Edouard, N., Espagnol, S., & Eugène, M. (2016). Measuring emissions from livestock farming: greenhouse gases, ammonia and nitrogen oxides: INRA-ADEME.
- Hendriks, J., Andries, A., Saevels, P., Leribaux, C., Vranken, E., Vinckier, C., Berckmans, D., De Bruyn, G., Baron, M., & Van Langenhove, H. (2001). *Ontwikkeling van een eenvoudige procedure voor de bepaling van geur- en ammoniakemissies van agrarische constructies ten behoeve van een aangepaste milieureglementering in Vlaanderen. DEEL 2 Meetprocedure voor ammoniak- en geuremissies van agrarische cons*.
- Ikeguchi, A., & Moriyama, H. (2010). Measurement method of ventilation rate with tracer gas method in open type livestock houses. XVIIth World Congress of the International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering (CIGR), Québec City, Canada.
- Janke, D., Willink, D., Ammon, C., Doumbia, E., Romer, A., Amon, B., Amon, T., & Hempel, S. (2022). Verification Analysis of Volume Flow Measured by a Direct Method and by Two Indirect CO₂ Balance Methods [Article]. *Applied Sciences-Basel, 12*(10), Article ARTN 5203. <https://doi.org/10.3390/app12105203>
- Janke, D., Willink, D., Ammon, C., Hempel, S., Schrade, S., Demeyer, P., Hartung, E., Amon, B., Ogink, N., & Amon, T. (2020). Calculation of ventilation rates and ammonia emissions: Comparison of sampling strategies for a naturally ventilated dairy barn. *Biosystems Engineering, 198*, 15-30. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.07.011>
- Joo, H., Ndegwa, P., Heber, A., Bogan, B., Ni, J., Cortus, E., & Ramirez-Dorransoro, J. (2014). A direct method of measuring gaseous emissions from naturally ventilated dairy barns [Article]. *Atmospheric Environment, 86*, 176-186. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.12.030>
- Joo, H. S., Ndegwa, P. M., Heber, A. J., Ni, J. Q., Bogan, B. W., Ramirez-Dorransoro, J. C., & Cortus, E. (2015). Greenhouse gas emissions from naturally ventilated freestall dairy barns. *Atmospheric Environment, 102*, 384-392. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.11.067>

- Kong, T. Y., Kim, S., Lee, Y., Son, J. K., & Maeng, S. J. (2017). Radioactive effluents released from Korean nuclear power plants and the resulting radiation doses to members of the public. *Nuclear Engineering and Technology*, 49(8), 1772-1777. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.net.2017.07.021>
- Konig, M., Hempel, S., Janke, D., Amon, B., & Amon, T. (2018). Variabilities in determining air exchange rates in naturally ventilated dairy buildings using the CO₂ production model [Article]. *Biosystems Engineering*, 174, 249-259. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.07.001>
- Korevaar, M., & Winkel, A. (2022). *Quick scan sensortechnologie voor monitoring luchtkwaliteit en emissies in de veehouderij*.
- KTBL. (2013a). Vorgehensweise zur Ermittlung repräsentativer Emissionsfaktoren –Messprotokoll für offene Stallsysteme – Beispiel Milchviehstall. Darmstadt: KTBL - Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft.
- KTBL. (2013b). Vorgehensweise zur Ermittlung repräsentativer Emissionsfaktoren –Messprotokoll für zwangsgelüftete Stallsysteme – Beispiel Mastschweine: KTBL - Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft.
- Li, H., Xin, H., Liang, Y., Gates, R. S., Wheeler, E. F., & Heber, A. (2005). Comparison of direct vs. indirect ventilation rate determinations in layer barns using manure belts. *Transactions of the ASAE*, 48(1), 367-372.
- Liang, Y., Xin, H., Wheeler, E. F., Gates, R. S., Li, H., Zajackowski, J. S., Topper, P. A., Casey, K. D., Behrends, B. R., Burnham, D. J., & Zajackowski, F. J. (2005). Ammonia Emissions From U.S. Laying Hen Houses in Iowa and Pennsylvania. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 48(5), 1927-1942.
- Liddament, M. W. (1996). *A guide to energy efficient ventilation, IEA Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme, Annex V*. Air Infiltration and Ventilation Centre, England.
- Linke, S., Clauß, M., Julia, M., Eisermann, J., & Schrader, L. (2023, 10/10/2023). *Ammoniakemissionen aus Masthühnerställen mit erhöhten Ebenen* Emissionen der Tierhaltung 2023 - erheben, beurteilen, mindern, Gustav-Stresemann-Institut, Bonn.
- LUC. (2020). LUC/O/001 Compendium voor monsterneming, meting en analyse van lucht - Meetplaats in het gaskanaal.
- MacLeod, M., Leinonen, I., Wall, E., Houdijk, J., Eory, V., Burns, J., Ahmadi, B. V., & Gómez-Barbero, M. (2019). *Impact of animal breeding on GHG emissions and farm economics* (EUR 29844 EN). Publications office of the European Union.
- MEL. (2020). Måling af emissioner til luften (pp. 1-30). Brøndby, Denmark: Miljøstyrelsens Referencelaboratorium for Måling af Emissioner til Luften (MEL).
- Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap. (2004). *Ministerieel besluit houdende vaststelling van de lijst van ammoniakemissiearme stalsystemen in uitvoering van artikel 1.1.2 en artikel 5.9.2.1bis van het besluit van de Vlaamse Regering van 1 juni 1995 houdende algemene en sectorale bepalingen inzake milieuhygiëne*. Brussel: Belgisch staatsblad
- Monica, C., Diego, G., Efsio, S., Fabio, F.-M., Francesco N, T., & Adrian, L. (2021). *EDGAR-FOOD emission data*. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.13476666.v1>
- Mosquera, J., Edouard, N., Guiziou, F., Melse, R. W., Riis, A. L., Sommer, S., & Brusselman, E. (2014). *Decision document on the revision of the VERA protocol on air cleaning technologies: Measuring techniques for the determination of the removal efficiency for ammonia*. Report 767.
- Mosquera, J., Groenestein, C. M., & Ogink, N. W. M. (2011). *Protocol voor meting van lachgasemissie uit huisvestingssystemen in de veehouderij 2010*.
- Mosquera, J., Hofschreuder, P., Erisman, J. W., Mulder, E., van 't Klooster, C. E., Ogink, N., Swierstra, D., & Verdoes, N. (2002). *Meetmethoden gasvormige emissies uit de veehouderij* (IMAG, Ed. Vol. 12). Wageningen Livestock Research (WLR).
- Mosquera, J., Hol, J. M. G., & Groenestein, C. M. (2010a). *Evaluatie van de CIGR methode voor de bepaling van het ventilatiedebiet uit stallen*.

- Mosquera, J., Van Dooren, H. J. C., Aarnink, A., & Ogink, N. W. M. (2010b). Development of a fast measurement method for the determination of ammonia emission reduction from floor related measures. XVIIth World Congress of the International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering (CIGR), Québec City, Canada.
- Mosquera, J., van Dooren, H. J. C., Hol, J. M. G., Ploegaert, J. P. M., & Ogink, N. W. M. (2022a). *Monitoring van methaan-, ammoniak- en lachgasemissies uit stallen voor biggen, dragende zeugen en vleesvarkens: Praktijkmetingen in de periode oktober 2018-oktober 2020.*
- Mosquera, J., van Dooren, H. J. C., Hol, J. M. G., Ploegaert, J. P. M., & Ogink, N. W. M. (2022b). *Monitoring van methaan-, ammoniak- en lachgasemissies uit twee natuurlijk geventileerde geitenstallen: Praktijkmetingen in de periode oktober 2018-oktober 2020.*
- Mosquera, J., van Dooren, H. J. C., Hol, J. M. G., Workel, L., Ploegaert, J. P. M., & Ogink, N. W. M. (2022c). *Monitoring van methaan-, ammoniak- en lachgasemissies uit stallen voor rosé vleeskalveren: Praktijkmetingen in de periode oktober 2018-oktober 2020.*
- Ogink, N. (2022). *Meetprogramma methaan en ammoniak - ontwikkeling meetmethoden stalemissies 2022-2025.*
- Ogink, N., Mosquera, J., & Hol, A. (2017). *Protocol voor meting van ammoniakemissie uit huisvestingssystemen in de veehouderij 2013a.*
- Ogink, N. W. M. (2011). *Protocol voor meting van geuremissie uit huisvestingssystemen in de veehouderij 2010.*
- Ogink, N. W. M., Hofschreuder, P., & Hol, J. M. G. (2011). *Protocol voor meting van fijnstofemissie uit huisvestingssystemen in de veehouderij 2010.*
- Ogink, N. W. M., Hol, J. M. G., & Mosquera, J. (2013a). *Protocol voor meting van ammoniakemissie uit huisvestingssystemen in de veehouderij 2013.*
- Ogink, N. W. M., Mosquera, J., Calvet, S., & Zhang, G. (2013b). Methods for measuring gas emissions from naturally ventilated livestock buildings: Developments over the last decade and perspectives for improvement. *Biosystems Engineering*, 116(3), 297-308. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.10.005>
- Ozcan, S. E. (2011). *Techniques to determine ventilation rate and airflow characteristics through naturally ventilated buildings* (Publication Number 985) K. U. Leuven].
- Pedersen, S., Blanes-Vidal, V., Joergensen, H., Chwalibog, A., Haeussermann, A., Heetkamp, M. J. W., & Aarnink, A. J. A. (2008). Carbon Dioxide Production in Animal Houses: A literature review. *Agricultural Engineering International: CIGR Ejournal*, X.
- Pedersen, S. M. G.-j., & X, H. T. H. (2004). Progress in Research into Ammonia and Greenhouse Gas Emissions from Animal Production Facilities. *Agricultural Engineering International: the CIGR Journal of Scientific Research and Development*, VI, 1-12.
- provincie Limburg. (2015). energiewinst in Limburg - Veehouderij. D. O. Landbouw en Platteland (Ed.), (D/2015/5.857/016 ed., Vol. D/2015/5.857/016). Hasselt: provincieraad van Limburg, Innovatiesteunpunt.
- Pryce, J. E., & Bell, M. J. (2017). The impact of genetic selection on greenhouse-gas emissions in Australian dairy cattle. *Animal Production Science*, 57(7), 1451-1456.
- Romanini, C. E., Youssef Ali Amer, A., Vranken, E., & Berckmans, D. (2013). Techniques for measuring ventilation rate through naturally ventilated buildings. *Emissions of Gas and Dust from Livestock*, 1, 362-366.
- Sällvik, K., & Pedersen, S. (2002). *International Commission of Agricultural Engineering (CIGR) report: Climatization of Animal Houses -- Heat and moisture production at animal and house levels.*
- Samer, M., & Abuarab, M. E. (2014). Development of CO₂ Balance for Estimation of Ventilation Rate in Naturally Cross-Ventilated Dairy Barns. *Transactions of the ASABE*, 57(4), 1255-1264. <https://doi.org/10.13031/trans.57.10572>
- Samer, M., Ammon, C., Loebstin, C., Fiedler, M., Berg, W., Sanftleben, P., & Brunsch, R. (2012). Moisture balance and tracer gas technique for ventilation rates measurement and greenhouse gases and ammonia emissions quantification in naturally ventilated buildings. *Building and Environment*, 50, 10-20. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.10.008>

- Samer, M., Berg, W., Fiedler, M., Ammon, C., Sanftleben, P., & Brunsch, R. (2011a). Radioactive ⁸⁵Kr and Co₂ Balance for Ventilation Rate Measurements and Gaseous Emissions Quantification Through Naturally Ventilated Barns. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 54(3), 1137-1148. <https://doi.org/10.13031/trans.57.10572>
- Samer, M., Loebstin, C., Fiedler, M., Ammon, C., Berg, W., Sanftleben, P., & Brunsch, R. (2011b). Heat balance and tracer gas technique for airflow rates measurement and gaseous emissions quantification in naturally ventilated livestock buildings. *Energy and Buildings*, 43(12), 3718-3728. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.10.008>
- Samer, M., Muller, H., Fiedler, M., Berg, W., & Brunsch, R. (2014). Measurement of ventilation rate in livestock buildings with radioactive tracer gas technique: Theory and methodology [Article]. *Indoor and Built Environment*, 23(5), 692-708. <https://doi.org/10.1177/1420326X13481988>
- Samer, M., Muller, H. J., Fiedler, M., Ammon, C., Glaser, M., Berg, W., Sanftleben, P., & Brunsch, R. (2011c). Developing the Kr-85 tracer gas technique for air exchange rate measurements in naturally ventilated animal buildings. *Biosystems Engineering*, 109(4), 276-287. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.04.008>
- Schep, C. A., van Dooren, H. J. C., Mosquera, J., van Well, E. A. P., Keuskamp, J. A., & Ogink, N. W. M. (2022). *Monitoring van methaan-, ammoniak- en lachgasemissies uit melkveestallen: Praktijkmetingen in de periode oktober 2018-oktober 2020*.
- Scheutz, C., & Kjeldsen, P. (2019). Guidelines for landfill gas emission monitoring using the tracer gas dispersion method. *Waste Management*, 85, 351-360.
- Schrade, S., Zeyer, K., Keck, M., Keller, M., Zähler, M., & Mohn, J. (2018). Validation of the tracer ratio method for emission measurements in naturally ventilated housing. *Agrarforschung Schweiz*, 9, 340-347.
- Sommer, S. G., McGinn, S. M., Hao, X., & Larney, F. J. (2004). Techniques for measuring gas emissions from a composting stockpile of cattle manure. *Atmospheric Environment*, 38(28), 4643-4652. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.05.014>
- Suen, M. (2008). Trifluoromethyl sulfur pentafluoride (CF₃SF₅): a review of the recently discovered super-greenhouse gas in the atmosphere. *The Open Atmospheric Science Journal*, 2(1).
- van Dooren, H., Blanken, K., van Valkengoed, P., Kamstra-Brouwer, H., & Galama, P. (2023). *Ammonia emissions of the CowToilet for use in dairy barns: case-control measurements at Dairy Campus*.
- Van Overbeke, P., De Vogeleer, G., Brusselman, E., Pieters, J. G., & Demeyer, P. (2015). Development of a reference method for airflow rate measurements through rectangular vents towards application in naturally ventilated animal houses: Part 3: Application in a test facility in the open. *Computers and Electronics in Agriculture*, 115. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.05.009>
- Van Overbeke, P., De Vogeleer, G., Mendes, L. B., Brusselman, E., Demeyer, P., & Pieters, J. G. (2016). Methodology for airflow rate measurements in a naturally ventilated mock-up animal building with side and ridge vents. *Building and Environment*, 105, 153-163. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.05.036>
- VDI. (2011). Determination of diffusive emissions by measurements Industrial halls and livestock farming VDI 4285 Blatt II. *VDI-Richtlinien*, 4285. <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-4285-blatt-2-determination-of-diffusive-emissions-by-measurements-industrial-halls-and-livestock-farming>
- Veichi, N. T., Mellqvist, J., & Scheutz, C. (2022). Quantification of methane emissions from cattle farms, using the tracer gas dispersion method. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 330, 107885. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.107885>
- veehouderij, W. r. e. (2024). *Richtlijnen voor het bepalen van emissies uit veestallen* (1470).
- VERA. (2018a). VERA Test Protocol for Air Cleaning Technologies (Version 2 ed., pp. 1-47): Verification of Environmental Technologies for Agricultural Production.
- VERA. (2018b). VERA Test Protocol for Livestock Housing and Management Systems (Version 3: 2019-8 ed.): Verification of Environmental Technologies for Agricultural Production.

- VERA. (2021). *Over VERA*. VERA. Retrieved november 10th 2021 from <https://www.vera-verification.eu/nl/over-vera/>
- Vlaamse Regering. (2021). *Ministerieel Besluit rond Ammoniakemissiearme Stalsystemen - 16/07/2021 - MB AEA*.
- Wageningen UR Livestock Research, L. (2024). Richtlijnen voor het meten van emissies uit veestallen. Wageningen: Wageningen Livestock Research.
- Wang, X., Ndegwa, P., Joo, H., Neerackal, G., Stockle, C., Liu, H., & Harrison, J. (2016). Indirect method versus direct method for measuring ventilation rates in naturally ventilated dairy houses [Article]. *Biosystems Engineering*, *144*, 13-25. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.01.010>
- Wu, W. T., Zhang, G. Q., & Kai, P. (2012). Ammonia and methane emissions from two naturally ventilated dairy cattle buildings and the influence of climatic factors on ammonia emissions. *Atmospheric Environment*, *61*, 232-243. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.07.050>
- Xin, H., Li, H., Burns, R. T., Gates, R. S., Overhults, D. G., & Earnest, J. W. (2009). Use of CO₂ concentration difference or CO₂ balance to assess ventilation rate of broiler houses. *Transactions of the ASABE*, *52*(4), 1353.
- Zhang, G., Strom, J. S., Li, B., Rom, H. B., Morsing, S., Dahl, P., & Wang, C. (2005). Emission of ammonia and other contaminant gases from naturally ventilated dairy cattle buildings. *Biosystems Engineering*, *92*(3), 355-364. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.08.002>

Instituut voor Landbouw-, Visserij- en Voedingsonderzoek ILVO
Eenheid Technologie en Voeding, Onderzoeksdomein Agrotechniek
Burg. Van Gansberghelaan 115, bus 1
B-9820 Merelbeke - Melle

Contact via e-mail: An.Verfaillie@ilvo.vlaanderen.be

December 2024

© Deze studie werd uitgevoerd in opdracht van het Beleidsdomein Omgeving. Alle rechten zijn voorbehouden aan ILVO. Vermenigvuldiging of overname van gegevens is toegestaan mits duidelijke bronvermelding. De gebruiker van dit rapport ziet af van elke klacht tegen het Vlaams Gewest of zijn werknemers, van welke aard ook, met betrekking tot het gebruik van de via dit rapport beschikbaar gestelde informatie. In geen geval zal het Vlaams Gewest of zijn werknemers aansprakelijk gesteld kunnen worden voor eventuele nadelige gevolgen die voortvloeien uit het gebruik van de via dit rapport beschikbaar gestelde informatie.

Contact

An Verfaillie
Instituut voor Landbouw-, Visserij- en Voedingsonderzoek ILVO
Burg. Van Gansberghelaan 115, bus 1
9820 Merelbeke-Melle
T +32 476 68 33 41
an.verfaillie@ilvo.vlaanderen.be

Deze publicatie kan ook geraadpleegd worden op:
www.ilvo.vlaanderen.be ⇒ nieuws ⇒ type ⇒ mededeling

Vermenigvuldiging of overname van gegevens is toegestaan mits duidelijke bronvermelding:

ILVO

Aansprakelijkheidsbeperking

Deze publicatie werd door ILVO met de meeste zorg en nauwkeurigheid opgesteld. Er wordt evenwel geen enkele garantie gegeven omtrent de juistheid of de volledigheid van de informatie in deze publicatie. De gebruiker van deze publicatie ziet af van elke klacht tegen ILVO of zijn ambtenaren, van welke aard ook, met betrekking tot het gebruik van de via deze publicatie beschikbaar gestelde informatie.

In geen geval zal ILVO of zijn ambtenaren aansprakelijk gesteld kunnen worden voor eventuele nadelige gevolgen die voortvloeien uit het gebruik van de via deze publicatie beschikbaar gestelde informatie.

The logo for ILVO, consisting of the letters 'ILVO' in a bold, green, sans-serif font. The letters are closely spaced and have a slight shadow effect.

Instituut voor Landbouw-, Visserij- en Voedingsonderzoek
Burg. Van Gansberghelaan 92
9820 Merelbeke-Melle - België

T +32 9 272 25 00
ilvo@ilvo.vlaanderen.be
www.ilvo.vlaanderen.be