



Praktijkvalidatie van het CIGR-model voor CO₂-productie in stallen met lacterende HF-melkkoeien

C.A. Schep, C.M. Levrault, N.W.M. Ogink

Rapport 1592



WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH

Praktijkvalidatie van het CIGR-model voor CO₂-productie in stallen met lacterende HF-melkkoeien

C.A. Schep, C.M. Levrault, N.W.M. Ogink

Wageningen Livestock Research

Dit onderzoek is uitgevoerd door Wageningen Livestock Research en gesubsidieerd door het Ministerie van Landbouw, Visserij, Voedselzekerheid en Natuur, in het kader van het Beleidsondersteunend onderzoek thema 'B1 Emissiereductie methaan veehouderij' (projectnummer BO-43.10-002-0480).

Wageningen Livestock Research
Wageningen, november 2025

Rapport 1592

Samenvatting NL

De emissies in de Nederlandse veehouderij worden bepaald op basis van metingen in stallen. Voor natuurlijk geventileerde stallen wordt daarvoor gebruik gemaakt van de CO₂-tracergasratio-methode die gebaseerd is op de geproduceerde CO₂ uit mest en dieren. Met deze tracergasmethode wordt de stalventilatie berekend. Voor lacterende melkkoeien wordt de CO₂-productie voorspeld met het CIGR-model als basis. Uit een praktijkvalidatie op onderzoeksfaciliteit Dairy Campus, blijkt dat dit CIGR-model de CO₂-productie van lacterende HF-melkkoeien met 16% onderschat. Deze afwijking kan het gevolg zijn van een ontwikkeling in dierenkenmerken zoals gewicht, melkproductie en dieractiviteit gedurende de afgelopen 25 jaar sinds het opstellen van het oorspronkelijke CIGR-model. De onderschatting in CO₂-productie heeft een proportioneel effect op de in melkveestallen bepaalde emissies van ammoniak en methaan die dus ook onderschat worden. Daarom is het van belang dat dit model wordt verbeterd zodat emissies nauwkeuriger kunnen worden bepaald.

Dit rapport is gratis te downloaden op <https://doi.org/10.18174/700580> of op www.wur.nl/livestock-research (onder Wageningen Livestock Research publicaties).



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

© Wageningen Livestock Research, onderdeel van Stichting Wageningen Research, 2025

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

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

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

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

Inhoud

Woord vooraf	5
Samenvatting	7
1 Introductie	11
2 Materiaal & Methoden	14
2.1 Dataset	14
2.1.1 Stalbeschrijving	14
2.1.2 Diergegevens	15
2.1.3 Concentratiemeting	16
2.1.4 Debietbepaling	16
2.1.5 Weersomstandigheden	17
2.1.6 Experimenteel protocol	17
2.1.7 Drijfmestanalyse	18
2.2 CIGR model: afleiding CO ₂ -productie en ventilatiedebiet	18
2.3 Statistische analyse	19
2.3.1 Filteren van gegevens	19
2.3.2 Validatie ventilatiewaarden: vergelijking model met gemeten stalventilatie	20
2.3.3 Autocorrelatie tussen de metingen	20
2.3.4 Differentiatie van CO ₂ -bronnen	21
2.3.5 Modelverbetering	21
3 Resultaten en discussie	22
3.1 Dierkenmerken	22
3.2 Modelvalidatie voor CO ₂ -productie	22
3.3 Modelvalidatie voor ventilatiedebiet	25
3.4 Verbetering schatting CO ₂ -productie uit drijfmest	28
3.5 Verbetering schatting ventilatieniveau op basis van de CO ₂ -productie melkkoeien	30
4 Algemene discussie - aanbevelingen en conclusies	33
4.1 Sterktes en beperkingen van deze studie	33
4.2 Literatuurvergelijking en reproduceerbaarheid van de resultaten	34
4.3 Afwijking van het CO ₂ -productiemodel en mogelijke oorzaken	34
4.4 Mogelijkheden voor nader onderzoek	35
4.5 Implicaties voor beleid, onderzoek en praktijk	37
4.6 Conclusie	37
Literatuur	39
Bijlage 1	41

Woord vooraf

De ammoniak- en broeikasgasemissies uit de veehouderij zullen de komende jaren aanzienlijk moeten afnemen om de doelen te halen van het nationale stikstof- en klimaatbeleid. Om dit te realiseren zijn betrouwbare meetmethodes nodig om de omvang van deze emissies vast te stellen. Emissies uit de melkveehouderij vormen een substantieel deel van de veehouderij-emissies. Voor het meten van stalemissies uit de melkveehouderij wordt in de meetpraktijk gebruik gemaakt van een methode gebaseerd op een combinatie van het meten van stalluchtconcentraties en een productiemodel om de CO₂-productie in de stal te schatten. Dit model is nodig om de stalventilatie en daarmee de emissie te kunnen bepalen. In de meetpraktijk wordt hiervoor het zogenoemde CIGR-model gebruikt. De nauwkeurigheid van dit model bepaalt mede de uiteindelijke nauwkeurigheid waarmee de stalemissie wordt gemeten.

Het ministerie van Landbouw, Visserij, Voedselzekerheid en Natuur heeft Wageningen Livestock Research (WLR) gevraagd onderzoek uit te voeren naar de nauwkeurigheid van het CIGR-model voor CO₂-productie in melkveestallen. Het WLR-projectteam heeft hiervoor een onderzoeksopzet uitgewerkt gebaseerd op vergelijking van modelresultaten met rechtstreekse meting van de CO₂-productie uit melkveestallen. Het onderzoekscentrum Dairy Campus in Leeuwarden beschikt over stallen met meetfaciliteiten voor directe meting van CO₂-productie. Hier zijn in twee stallen metingen uitgevoerd gedurende een aantal periodes in het winter- en zomerseizoen. In de analyse is de nauwkeurigheid van zowel de dier- als de mestcomponent van het model onderzocht. De analyse is mede ondersteund met statistische expertise door de groep Biometris van Wageningen UR. Het projectteam dankt alle medewerkers voor hun inzet en waardevolle medewerking.

De auteurs

Samenvatting

De melkveehouderij is een belangrijke sector met ca. 14.000 bedrijven en veel indirecte werkgelegenheid in de toeleverende en verwerkende industrie. De voedselproductie in deze sector gaat gepaard met emissies uit dier en mest, waarvan de omvang een substantieel aandeel vertegenwoordigt in de nationale methaan- en ammoniakemissie (CH_4 en NH_3). Onderdeel van de nationale doelstellingen in het stikstof- en klimaatbeleid is de komende jaren de NH_3 - en CH_4 -emissie uit de veehouderij aanzienlijk terug te dringen. Om deze beleidsdoelstellingen te kunnen realiseren zijn betrouwbare meetmethodes nodig om NH_3 - en CH_4 -emissies uit stallen vast te stellen. Omdat melkveestallen natuurlijk geventileerd wordt voor het meten van emissies een indirecte meetmethode toegepast om de hiervoor benodigde stalventilatie te kunnen meten. Er wordt gewerkt aan een directe meetmethode, maar deze moet nog worden gevalideerd (ILVO, 2025 Mededeling D/2025/06). Deze indirecte meetmethode voor stalventilatie is gebaseerd op het zogenoemde CIGR-model. Dit model, dat oorspronkelijk was ontwikkeld door de 'Commission Internationale du Génie Rural' (CIGR) om de warmteproductie van verschillende diercategorieën te berekenen, is later opgewaardeerd tot een CO_2 -productiemodel (Pedersen et al., 2008). In het geval van melkkoeien is een drijfmestcomponent toegevoegd, zodat de totale CO_2 -productie van een conventionele stal kan worden berekend. Gecombineerd met gemeten concentratietoenames van CO_2 , NH_3 en CH_4 in de stal kan hieruit de stalemissie van NH_3 en CH_4 gedurende een tijdvak worden bepaald. Al deze modelleringsstappen samen komen overeen met wat in dit rapport het "CIGR-model" wordt genoemd. Elk model kent echter onzekerheden. Onzekerheden in de schatting van het CO_2 -productieniveau vertalen zich rechtstreeks door naar onzekerheden in NH_3 - en CH_4 -emissies uit melkveestallen. De basis van het CIGR-model is gepubliceerd in 2002 en gebaseerd op toenmalig bekend onderzoek in respiratiecellen en proefafdelingen. Een validatie onder praktijkomstandigheden is gewenst gezien het belang van dit model voor het nauwkeurig kunnen bepalen van emissies uit melkveestallen. Daarnaast kunnen vragen rond representativiteit voor huidige productieomstandigheden, de nauwkeurigheid van de bijdrage van mestopslag in de stal en de effecten van het benaderend inschatten van benodigde invoergegevens geadresseerd worden in een dergelijke validatiestudie.

Doelstelling

Dit rapport beschrijft onderzoek naar de nauwkeurigheid van het CIGR-model voor CO_2 -productie in melkveestallen en hieruit berekende stalventilatie met de volgende doelen:

- Validatie van het CIGR-model in een praktijkomgeving door vergelijking van de modelresultaten met directe metingen van CO_2 -productie en stalventilatie uitgevoerd door een referentiemethode;
- Het evalueren van de bijdrage van mestvolume en temperatuur aan de CO_2 -productie van de opgeslagen drijfmest in de stal;
- Het onderzoeken van het effect van de berekeningswijze op de nauwkeurigheid van de geschatte stalproductie van CO_2 door vergelijking van de gangbare koppelgemiddelde invoerwaarden in het CIGR-model met individuele invoerwaarden van de aanwezige dieren.
- Het uitwerken van voorstellen voor een verbeterd model.

Het onderzoek is uitgevoerd op het onderzoekscentrum Dairy Campus in Leeuwarden met mechanisch geventileerde stalcompartimenten die validatie van het CIGR-model met een directe meetmethode onder praktijkomstandigheden mogelijk maakt.

Methode

Met het CIGR-model wordt de CO_2 -productie uit dier en drijfmest bepaald op basis van het diergewicht, de melkproductie en de drachtijd. Omdat het model op verschillende manieren toegepast wordt in de praktijk zijn in deze studie drie aggregatieniveaus gedefinieerd en gevalideerd:

1. **Dier-specifiek** door de CO_2 -productie te berekenen per individueel dier met dierspecifieke gegevens voor gewicht, melkproductie en drachtijd,
2. **Koppel-specifiek** door de CO_2 -productie te berekenen met koppelgemiddelde diergegevens voor gewicht, melkproductie en drachtijd en
3. **Koppel-standaard** door de CO_2 -productie te berekenen met de koppelgemiddelde melkproductie en standaardwaarden voor diergewicht (650 kg) en drachtijd (160 dagen).

De validatie van het CIGR-model is uitgevoerd door het voorspelde ventilatiedebiet te toetsen aan het gemeten ventilatiedebiet. In 2024 zijn gedurende drie meetperiodes in april, augustus en december van elk drie weken de benodigde gegevens verzameld. Het daadwerkelijke ventilatiedebiet en de inputgegevens voor het CIGR-model zijn gemeten in twee identieke compartimenten binnen de 'milieustal' op Dairy Campus (Leeuwarden). Deze compartimenten zijn mechanisch geventileerd en huisvestten elk 16 lacterende melkkoeien. Naast het ventilatiedebiet, is in deze compartimenten van de aanwezige melkkoeien dagelijks het diergewicht, de melkproductie en de drachtijd bepaald als inputgegevens voor het CIGR-model. Ook zijn aanvullende gegevens zoals temperatuur en drijfmesteigenschappen bepaald ten behoeve van de verbetering van het model.

De drie meetperiodes (van elk drie weken) hadden als doel om de totale CO₂-productie en de CO₂-productie uit alleen drijfmest te kunnen bepalen. Ten behoeve hiervan is tijdens elk van de meetperiodes zowel gemeten met een hoog als een laag drijfmestniveau. Om het de CO₂-productie uit drijfmest te kunnen meten zijn de koeien tijdens de tweede week van elke meetperiode uit de stal gehaald. Een overzicht van de meetopzet is zichtbaar in Tabel S1.

Tabel S1 Proefopzet per meetperiode voor de validatie van het CIGR-model om de CO₂-productie uit melkkoeien en drijfmest te bepalen in een melkveestal.

Week in meetperiode	Drijfmestniveau	Melkkoeien	Ventilatie [m ³ ·uur ⁻¹ ·dier ⁻¹]
Week 1	Hoog	Aanwezig	500 - 2000
Week 2	Hoog → Laag	Afwezig	500
Week 3	Laag	Aanwezig	500 - 2000

Indicatoren waarop de implementaties van het CIGR-model zijn gevalideerd waren: de voorspellingsfout, correlatiecoëfficiënt, concordantiecorrelatiecoëfficiënt en de uitsplitsing van de voorspellingsfout naar een systematische fout, regressiefout en een toevalsfout.

Resultaten

Uit de resultaten blijkt dat het CIGR-model de totale CO₂-productie van lacterende melkkoeien en bijbehorende drijfmestopslag onderschat. Zoals benoemd, zijn er drie verschillende implementaties van het CIGR-model gevalideerd en afhankelijk van de gebruikte implementatie, wordt de CO₂-productie met 16% - 24% onderschat. De modelimplementatie 'koppel-standaard' wordt het meest toegepast in de huidige meetpraktijk en resulteerde in het kleinste verschil met een onderschatting van 16%. Omdat de geproduceerde CO₂ een directe maat is voor de hoeveelheid ventilatie, wordt het ventilatiedebiet dus ook met 16% - 24% onderschat.

Voorafgaand aan het experiment was de verwachting dat de CO₂ productie uit drijfmest niet betrouwbaar is. Deze verwachting is gebaseerd op het feit dat in het huidige CIGR-model, de CO₂-productie is gebaseerd op dierkenmerken (diergewicht, melkproductie en drachtijd), terwijl uit de literatuur dit verband niet bekend is. Uit de meetresultaten bleek dan ook dat voor elk van de modelimplementaties (dier-specifiek, koppel-specifiek en koppel-standaard) was de ventilatiedebietschatting op basis van de CO₂-productie uit drijfmest niet goed is. De modelcomponent 'drijfmest' vereist daarmee een verbetering.

De vernieuwde modelcomponent voor drijfmest volgend uit deze studie voorspelt de CO₂-productie uit drijfmest (m³CO₂ · m⁻³drijfmest · uur⁻¹) op basis van het drijfmestvolume en de buitentemperatuur (°C) via Formule S1:

$$PCO2_{drijfmest} = (-0,27 + 0.43 \times \text{Buitentemperatuur})/1000 \quad \textbf{Formule S1}$$

De fout in het ventilatiedebiet op stalniveau bij aanwezigheid van de dieren is voor 80% systematisch. Een goede correlatie tussen het voorspelde en gemeten ventilatiedebiet is gevonden (0,98). Op basis van deze waarnemingen, is er in deze rapportage een correctiefactor opgesteld waarmee de voorspelling van het ventilatiedebiet (m³·dier⁻¹·uur⁻¹) gecorrigeerd kan worden. Deze correctiefactor is beschreven met Formule S2 voor de modelimplementatie 'koppel-standaard':

Na toepassing van de vernieuwde modelcomponent voor drijfmest en het gecorrigeerde ventilatiedebiet op basis van de CO₂-productie van het dier, bleek dat de voorspellingsfout verlaagd kon worden naar 5% en volledig toegeschreven kan worden aan toevalsfouten. Het is relevant om deze toegepaste correcties te toetsen met andere (onafhankelijke) datasets. In een lege stal (bijvoorbeeld tijdens weidegang) is de voorspelde CO₂-productie uit alleen drijfmest nog onvoldoende betrouwbaar om het ventilatiedebiet mee te kunnen bepalen ondanks verbeteringen in de schatting van de CO₂-productie uit drijfmest. Dit is naar verwachting echter niet alleen een modelfout, maar ook het gevolg van zeer lage CO₂-concentratieverschillen tussen stal en achtergrond.

Conclusies en implicaties

Deze studie toont aan dat, onder de specifieke omstandigheden waarin het experiment is uitgevoerd, het ventilatiedebiet in huidige onderzoeken met natuurlijk geventileerde melkveestallen 16% wordt onderschat wanneer de modelimplementatie 'koppel-standaard' wordt toegepast. Bij de andere modelimplementaties kan de onderschatting oplopen tot 24%. Deze resultaten zijn in lijn met het vorig jaar verschenen onderzoek van (Kjeldsen et al., 2024a). Een onderschatting van de CO₂-productie betekent dat de emissie van ammoniak en methaan uit natuurlijk geventileerde melkveestallen ook met 16-24% wordt onderschat.

De gevonden resultaten in deze studie kunnen helpen om de discrepantie tussen berekende en gemeten stikstofniveaus in drijfmest, zoals gevonden in eerdere studies van Van Bruggen & Geertjes (2019) en Groenestein et al. (2023), te duiden. De resultaten uit het huidige onderzoek hebben echter geen invloed op de bevindingen van Groenestein et al. (2023) over het ontbreken van een significant verschil in stikstofgehalten in de mest tussen conventionele en emissie-arme stalsystemen. Het is belangrijk om ervan bewust te zijn dat het huidige onderzoek is uitgevoerd met hoogproductieve Holstein-Friesian-melkkoeien die één voederregime kregen. De resultaten en conclusies zijn daarom niet zonder meer door te vertalen naar andere rassen en afwijkende productieniveaus. Concluderend zijn er sterke aanwijzingen dat het ventilatieniveau op basis van het CIGR-model bij hoogproductieve HF-melkkoeien wordt onderschat.

Om de nauwkeurigheid van toekomstige emissieschattingen te waarborgen, moet het CIGR-model worden vernieuwd. Hiervoor moeten de modelcoëfficiënten voor de berekening van de warmteproductie (melkproductie, drachtijd en lichaamsgewicht) en de omrekeningsfactor naar CO₂-productie worden geüpdatet zodat ze representatief zijn voor de melkgevende koeien die in West-Europa wordt gehouden. Hiervoor is aanvullend onderzoek vereist zodat een brede range aan rassen en productieniveaus meegenomen kan worden. Dergelijk onderzoek is echter gepubliceerd door Kjeldsen et al. (2024b). De in deze studie opgestelde modellen kunnen gevalideerd worden onder praktijkomstandigheden. Als deze modellen voldoende nauwkeurig blijken te zijn, zal er nog wel een drijfmestcomponent moeten worden toegevoegd aangezien deze nu ontbreekt. Op korte termijn zou gebruik gemaakt kunnen worden van een directe correctiefactor (Formule S2) voor het bestaande CIGR-model.

1 Introductie

De melkveehouderij is in Nederland een belangrijke sector met ca. 14.000 bedrijven en veel indirecte werkgelegenheid in de toeleverende en verwerkende industrie (CBS, 2024). De productie van melk en vlees gaat gepaard met uitstoot van ammoniak (NH_3) en methaan (CH_4). De huidige NH_3 -emissie in Nederland leidt tot te hoge stikstofdeposities op natuurgebieden en afname van luchtkwaliteit. De CH_4 -uitstoot draagt bij aan het opwarmende effect op het klimaat. Het overgrote deel (circa 90%) van de NH_3 -emissie in Nederland komt uit de agrarische sector, waarvan een substantieel deel afkomstig is uit de melkveesector (Marra et al., 2024). Daarnaast bedraagt de CH_4 -emissie uit de veehouderij 75% van de totale Nederlandse CH_4 -emissie van methaan. Twee derde van de CH_4 -emissie uit de veehouderij is afkomstig uit de zuivelsector (CBS, 2024). Een belangrijk onderdeel van de nationale doelstellingen in het stikstof- en klimaatbeleid is om de komende jaren de NH_3 - en CH_4 -emissie uit de veehouderij aanzienlijk terug te dringen. In het kader van het stikstofbeleid wordt hierbij onder meer ingezet op de ontwikkeling van doelsturing door middel van monitoring op bedrijfsniveau. Om de beleidsdoelstellingen te kunnen realiseren zijn betrouwbare meetmethodes nodig om de omvang van NH_3 - en CH_4 -emissies vast te stellen.

De emissies uit de melkveehouderij komen voort uit huisvesting, mestopslag en bij het aanwenden van mest op het land. De emissie uit de stal wordt bepaald door de het stalventilatie-debiet te vermenigvuldigen met de concentratietoename van de emissiecomponent in de stallucht. Bij een emissiemeting moet dus zowel het ventilatie-debiet van de stal als de concentratietoename vastgesteld worden. Het ventilatie-debiet van stallen met ventilatoren, zoals gebruikelijk in varkens- en pluimveestallen, kan relatief eenvoudig vastgesteld worden met meetwaaiers in de ventilatiekokers. Bij melkveestallen is dat aanzienlijk complexer omdat melkveestallen natuurlijke ventilatie hebben waarbij lucht via door openingen in de zijanten en de nok van de stal wordt ververst. De ventilatie kan hier door de grote omvang van de uitwisselingsvlakken niet volledig met meetwaaiers worden gemeten. Daarom wordt voor deze stallen vaak een andere, indirecte, meetmethode toegepast. Deze methode is gebaseerd op het gegeven dat het ventilatie-debiet kan worden afgeleid via het meten van de concentratietoename van een gas in de stal waarvan de productiesnelheid in de stal bekend is. In de meetpraktijk wordt hiervoor de CO_2 -productie van de aanwezige dieren en mestopslag gebruikt die met behulp van informatie over de aanwezige dieren modelmatig kan worden berekend (Werkgroep richtlijnen emissies veehouderij, 2024). Gecombineerd met gemeten concentratietoenames van CO_2 , NH_3 en CH_4 in de stal kan hieruit de emissie van NH_3 en CH_4 op dagniveau worden berekend. Het productiemodel voor CO_2 heeft hierdoor een centrale rol in emissiemetingen van dit staltype.

Momenteel wordt de CO_2 -productie van de dieren in de stal geschat met een afgeleide versie van een warmteproductiemodel dat is opgesteld door de 'Commission Internationale du Génie Rural' (CIGR). Hoewel het oorspronkelijke doel van het CIGR-model is om de warmteproductie van de dieren te berekenen (CIGR, 2002), maakte de latere aanpassing door Pedersen et al. (2008) het mogelijk om uit de geproduceerde warmte ook de CO_2 -productie van een aantal diercategorieën te schatten. Voor melkkoeien maakt het model daarbij gebruik van de diervariabelen gewicht, melkopbrengst en drachtijd. Hiermee kan de totale CO_2 -productie van de dieren in de stal berekend worden. In de publicatie van Pedersen et al. (2008) werd eveneens een eenvoudige benaderende rekenregel voor de bijdrage van drijfmest (aanwezig in de mestput) geïntroduceerd. De omvang hiervan werd ingeschat op 10% van de totale CO_2 -productie van de stal. De uitgebreide versie met de hiervoor genoemde stappen wordt in dit rapport verder kortweg aangeduid als het "CIGR-model" en wordt gebruikt om de totale CO_2 -productie van een stal te berekenen. Gecombineerd met het meten van het CO_2 -concentratieverschil tussen in- en uitstromende stallucht kan hieruit het ventilatie-debiet en vervolgens de emissie worden berekend. Elk model kent echter onzekerheden. Afwijkingen in de schatting van het CO_2 -productieniveau t.o.v. de werkelijke waarde vertalen zich rechtstreeks door als proportioneel gelijke afwijkingen van berekende NH_3 - en CH_4 -emissies van de werkelijke waarden. Een onder- of overschatting van bv. 10% in het CIGR-model resulteert in een gelijke onder- of overschatting van 10% van de te bepalen emissies. Mosquera et al. (2012) onderzochten eerder de nauwkeurigheid van door het CIGR-model geschatte ventilatieniveaus voor een aantal diercategorieën door

vergelijking met directe referentiemethoden. Zij concludeerden dat geschatte ventilatieniveaus voor pluimvee- en varkenscategorieën goed overeenkwamen met de direct gemeten niveaus door middel van meetventilatoren. Voor de melkvee-categorie was geen directe referentiemethode beschikbaar. Hier werd het CIGR-model vergeleken met een andere externe tracergas-methode die hogere waarden liet zien, maar waarbij geconcludeerd werd dat een directe referentiemethode gebaseerd op meetventilatoren nodig is om het CIGR-model goed te kunnen valideren.

Het CIGR-model is meer dan 20 jaar geleden ontwikkeld op basis van onderzoeksgegevens van melkkoeien met productiekenmerken die representatief waren voor de daaraan voorafgaande periode. Inmiddels zijn de productiekenmerken als gevolg van genetica en voermanagement aanzienlijk gewijzigd met beduidend hogere productieniveaus tot gevolg. Zo steeg in Nederland de melkproductie per melkkoe tussen 1990 en 2024 met meer dan de helft van ca. 6000 (Bikker et al., 2019) naar ca. 9300 kg per jaar in 2024 (CRV, 2024). Vraag is in hoeverre het CIGR-model representatieve CO₂-productieniveaus kan berekenen met het deels verschuiven van productieniveaus buiten de bandbreedte waarop het eerder is ontwikkeld. Een ander aspect dat de nauwkeurigheid van dit model kan beïnvloeden is de wijze waarop de CO₂-productie van de drijfmestopslag in de stal wordt ingerekend. In het huidige model wordt dit generiek ingeschat als zijnde 10% van de totale CO₂-productie van de aanwezige dieren. Zoals toegelicht door Pedersen et al. (2008) is dit met het toenmalig ontbreken van directe meetgegevens gebaseerd op een benaderende inschatting die zowel van toepassing is verklaard op varkensstallen als rundveestallen. Deze rekenregel is niet grondig geëvalueerd. Factoren die invloed kunnen hebben op deze productie zoals aanwezig drijfmestvolume, opslagduur van de drijfmest en temperatuur zijn door het ontbreken van verklarende modellen hierin niet betrokken.

Bij meting van stalemissies op praktijkbedrijven zijn de benodigde invoergegevens voor berekening van CO₂-producties meestal niet op dierniveau beschikbaar. Wel kan worden beschikt over de gemiddelde melkproductie van de aanwezige koppel dieren, maar voor gewicht en drachtstadium per dier is dat veelal niet beschikbaar. Deze gegevens worden dan in samenspraak met het bedrijf of op basis van standaardwaarden in het meetprotocol vastgesteld. Ook hier rijst de vraag in hoeverre deze benadering invloed heeft op de nauwkeurigheid van de berekende productie.

Het CIGR-model voor CO₂-productie in melkveestallen is gebaseerd op basis van metingen in respiratiecellen en proefafdelingen. Tot dusver is het niet gevalideerd tegen een referentiemethode in een praktijkomgeving. Dit is wel gewenst gezien het belang van dit model voor het nauwkeurig kunnen meten van melkveestallen en vragen rond representativiteit voor huidige productieomstandigheden, de nauwkeurigheid van de bijdrage van drijfmestopslag in de stal en de effecten van het middelen en benaderend inschatten van benodigde invoergegevens.

Dit rapport beschrijft een onderzoek van het CIGR-model voor CO₂-productie in melkveestallen en het hieruit berekende ventilatiedebiet met de volgende doelen:

- Validatie van het CIGR-model in een praktijkomgeving door vergelijking van de modelresultaten met directe metingen uitgevoerd met een referentiemethode;
- Het evalueren van de bijdrage van drijfmestvolume en temperatuur aan de CO₂-productie van de opgeslagen drijfmest in de stal;
- Het onderzoeken van het effect van de berekeningswijze op de nauwkeurigheid van de geschatte stalproductie van CO₂ door vergelijking van de gangbare koppelgemiddelde invoerwaarden in het CIGR-model met individuele invoerwaarden van de aanwezige dieren.
- Het uitwerken van voorstellen voor een verbeterd model.

Het onderzoek is uitgevoerd op het onderzoekscentrum Dairy Campus in Leeuwarden met mechanisch geventileerde stalcompartimenten die validatie van het CIGR-model met een directe meetmethode onder praktijkomstandigheden mogelijk maakt. In eerste instantie werd dit onderzoek gestart in 2021, maar door meetproblemen in de betrokken onderzoeksafdelingen moest dit afgebroken worden, en kon het vervolgens niet eerder ingepland worden dan begin 2024. Het onderzoek is uitgevoerd met melkkoeien van het Holstein-Friesian ras met productieniveaus die representatief zijn voor het merendeel van de Nederlandse praktijkbedrijven. De validatie van het CIGR-model in deze studie beperkt zich daarmee tot dit ras en dit

productieniveau. Resultaten en conclusies zijn daardoor niet zonder meer door te vertalen naar andere rassen en afwijkende productieniveaus.

2 Materiaal & Methoden

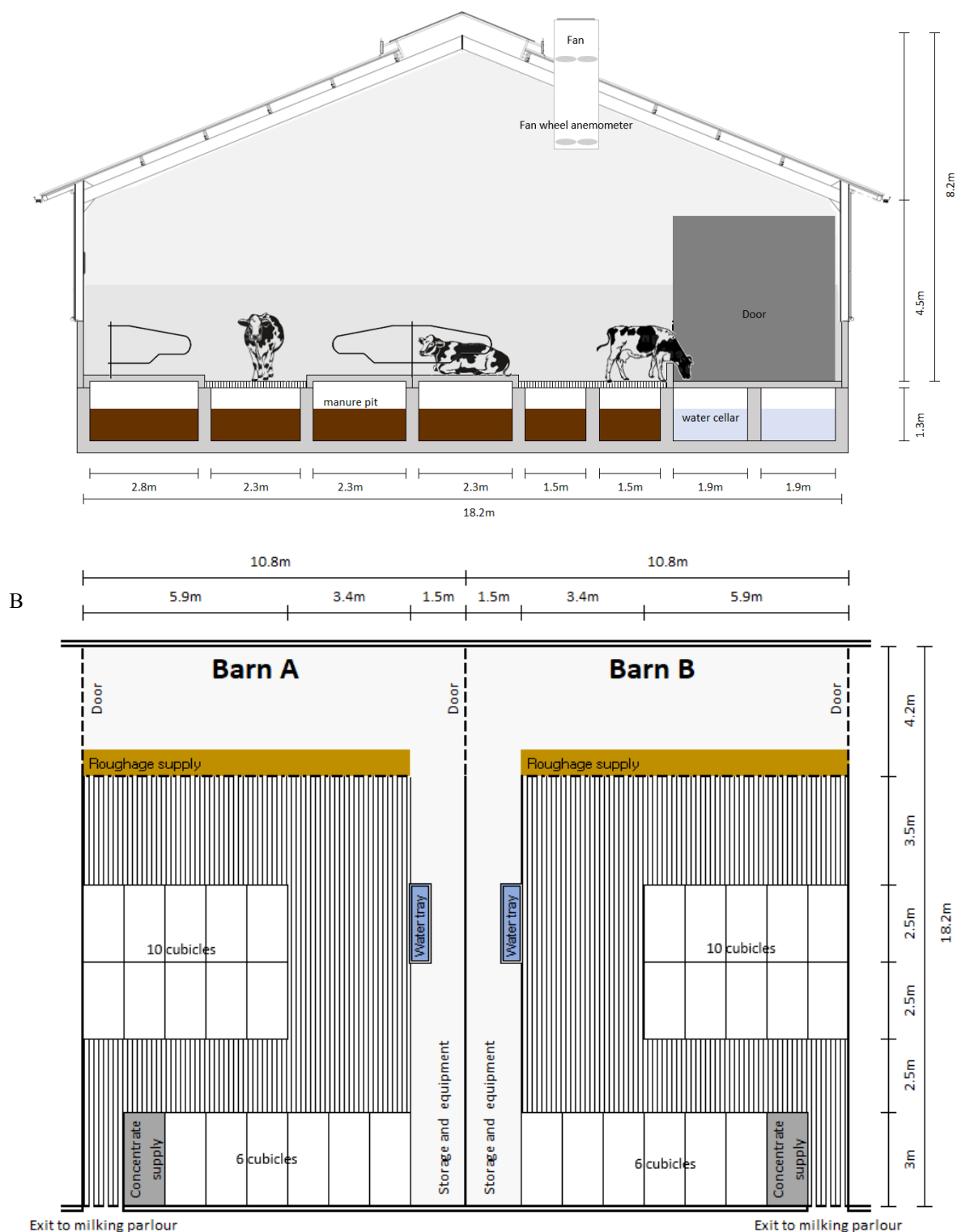
2.1 Dataset

2.1.1 Stalbeschrijving

De dataset die is gebruikt om het CIGR-model te toetsen, is verkregen met een experiment dat is uitgevoerd in de onderzoeksfaciliteiten van Dairy Campus (Leeuwarden, Nederland) in 2024. Het onderzoek voldeed aan eisen gesteld in de Wet op de Dierproeven en in overeenstemming met de EU-richtlijn 2010/63. Het onderzoek is uitgevoerd in drie meetperiodes verdeeld over het jaar (periode 1: 25 april tot 18 mei 2024; periode 2: 1 tot 21 augustus 2024 en periode 3: 28 november tot 23 december 2024). Het doel van de verdeling van de meetperioden over het jaar was om variatie te creëren in dierkenmerken en meetomstandigheden.

Het onderzoek is uitgevoerd in twee identieke, maar onafhankelijke compartimenten (A en B) in de 'Milieustal' op Dairy Campus. Beide compartimenten hebben een huisvestingscapaciteit van 16 melkkoeien en zijn voorzien van een roostervloer met daaronder een drijfmestkelder met een opslagcapaciteit van 180 m³. Luchtuitwisseling tussen compartimenten is geminimaliseerd door de compartimenten van elkaar te scheiden via een luchtdicht doek en de aanwezigheid van een eigen drijfmestkelder in elk van de compartimenten. De overheaddeur op de voergang was tijdens het onderzoek alleen geopend tijdens het melken van de dieren (5:00-7:30 en 15:00-17:30) ten behoeve van het voeren en het aanschuiven van het voer.

De compartimenten zijn mechanisch geventileerd met twee ventilatoren per compartiment (Fancor 1680M, Panningen, Nederland; maximum capaciteit 20.750 m³/uur) met een monsternamepunt voor de bepaling van de CO₂-concentratie in de uitgaande lucht in de ventilatiekamer. De openingen aan de zijkanten van de compartimenten dienden als luchtinlaat. Deze openingen zijn voorzien van windbreekgaasgordijnen die tijdens de metingen volledig gesloten waren om dwarsventilatie te minimaliseren. Een dwarsdoorsnede en plattegrond van de compartimenten is opgenomen in Figuur 2.1.



Figuur 2.1 Plattegrond van de milieuonderzoeksstallen van Dairy Campus. A) Dwarsdoorsnede van de compartimenten (A en B zijn identiek). B) Boven-aanzicht van compartimenten A en B.

2.1.2 Diergegevens

Tijdens de meetperioden zijn in compartiment A en B twee groepen van 16 lacterende Holstein-Friesian koeien gehuisvest. Voorafgaand aan elke meetperiode zijn de diergroepen voor compartiment A en B samengesteld met als criterium dat het diergewicht, melkproductie en drachttijd op koppelniveau zo gelijk mogelijk is. De dieren kregen een TMR (Total Mixed Ration) rantsoen gevoerd bestaande uit 25% mais en 70% graskuil aangevuld met soja en pulpbrok. Een aanvullende krachtvoergift is dierspecifiek toegekend via de krachtvoerbox.

De inputvariabelen diergewicht, melkproductie en drachtijd voor het CIGR-model werden tweemaal per dag op dierniveau bepaald, hetzij tijdens of vlak na het melken. Van het diergewicht zijn daggemiddelden samengesteld en de melkproductie per dag is bepaald door de melkproductie van ochtend- en avondmelking bij elkaar op te tellen., alvorens te worden samengevoegd tot daggemiddelde waarden.

2.1.3 Concentratie meting

De CO₂-concentraties van ingaande en uitgaande lucht zijn gemeten op verschillende monsternamepunten. De concentratie van de ingaande lucht gemeten op 4 monsternamepunten gepositioneerd op 5 meter naast de stal zoals aangegeven in Figuur 2.2 (linker-figuur). De concentratie van de uitgaande lucht is gemeten via een monsternamepunt in elk van de twee ventilatiekokers van de stal zoals aangegeven in Figuur 2.2 (rechter-figuur). De verschillende monsternamepunten zijn via PFTE-leidingen (Φ ¼ inch) gekoppeld aan een meetpuntomschakelaar van waaruit de CO₂-concentratie per monsternamepunt is gemeten met twee gasanalysers (Picarro G2508, Santa Clara, VS). Op elk van de meetpunten is de concentratie gedurende 5 minuten bepaald waarvan de eerste minuut buiten beschouwing is gelaten om te corrigeren voor de omschakeltijd. De gasanalysers zijn gekalibreerd in het Air Quality Lab van Wageningen Livestock Research in oktober 2023 en november 2024.



Figuur 2.2 Links: Positionering van de achtergrondbemonsteringspunten (blauwe punten) rond de compartimenten A en B (Environmental Research Barn) (Winkel et al., 2019). Rechts: Foto van een van de twee (identieke) compartimenten in de proefstal. Blauwe Punten vertegenwoordigen de twee gasbemonsteringsinlaten.

2.1.4 Debietbepaling

Om de CO₂-productie uit de stallen te bepalen is het ventilatiedebiet continu bepaald via een meetwaaier onder elke ventilator. Elk van de meetwaaiers is gekalibreerd voorafgaand aan elke meetperiode en per meetwaaier is een kalibratielijn vastgesteld.

Ter controle van de volledigheid van het ventilatiedebiet van de compartimenten A en B, zijn in april 2024 en oktober 2024 recovery tests uitgevoerd waarbij een bekende hoeveelheid gas is geïnjecteerd en bepaald welk deel van dit gas is teruggemeten door de meetapparatuur. Tijdens deze tests is het ventilatiedebiet ingesteld op 500, 1250 en 2000 m³·uur⁻¹·dier⁻¹. Het windbreekgaas-gordijn was gedurende de gehele duur van de tests gesloten. De recovery test is uitgevoerd met N₂O (99,95% zuiver, SOL Nederland) als tracergas dat is geïnjecteerd via een massaflowcontroller (F-201C-FA-22-V, Bronckhorst Nederland) met een snelheid van 38 gram per uur. De N₂O is onder een overdruk van 1-2 bar geïnjecteerd via 12 injectiepunten per compartiment (3 injectielijnen: 1-voerhek, 2-centrale boxen, 3-achter de achterste boxen, dicht bij de inkomende lucht). In totaal is hierbij 60-81 gram N₂O toegediend gedurende een periode (t) van 2-2,5 uur.

De N₂O-concentratie van de uitgaande lucht is continu gemeten via de meetleidingen in de ventilatiekokers (zie 2.1.3) met een gasanalyser (Picarro G2508, Santa Clara, VS). De N₂O concentratie van de uitgaande lucht in het uur voorafgaand aan de injectie is gebruikt als achtergrondconcentratie ($C_{\text{achtergrond}}$). Op basis van het concentratieverschil tussen de uitgaande lucht (C_{stal}) tijdens N₂O injectie en de achtergrondconcentratie is met Formule 1 de totale hoeveelheid N₂O ($m_{\text{recovered}}$) bepaald die via de ventilatoren de stal verlaten heeft. Om het molair volume (MV), dat afhankelijk is van temperatuur (T_{stal}) en luchtdruk, te bepalen is Formule 2 toegepast op basis van KNMI-gegevens (paragraaf 2.1.5). De uiteindelijke recovery rate is berekend met Formule 3 waarin m_{injected} de som is van de massaflowcontroller data per minuut.

$$M_{\text{recovered}} = \sum_{t=0}^t VR \times (C_{\text{stal}} - C_{\text{achtergrond}}) / 10^6 \times 1000 \times 44.01 / MV \quad \text{Formule 1}$$

Met $M_{\text{recovered}}$ in g, VR in $\text{m}^3 \cdot \text{uur}^{-1}$, C_{stal} en $C_{\text{achtergrond}}$ in ppm en MV in $\text{L} \cdot \text{mol}^{-1}$.

$$MV = 8.314 \times (T_{\text{stal}}) / \text{luchtdruk} \quad \text{Formule 2}$$

Met MV in $\text{L} \cdot \text{mol}^{-1}$, T_{stal} in K en luchtdruk in Pa.

$$\text{Recovery rate} = m_{\text{recovered}} / m_{\text{injected}} \times 100 \quad \text{Formule 3}$$

Met Recovery rate in %, $m_{\text{recovered}}$ en m_{injected} in g.

De recovery test resulteerde in een recovery rate van 105% en 98% voor respectievelijk compartiment A en B. Op basis van de recovery rates is het gemeten ventilatiedebiet tussen ingaande en uitgaande lucht gecorrigeerd.

2.1.5 Weersomstandigheden

Informatie over de weersomstandigheden rondom de stal is op uurbasis verkregen via het KNMI weerstation in Leeuwarden (stationcode 270). Omdat de temperatuur- en luchtvochtigheidsensoren in de stal niet goed bleken te functioneren, is de staltemperatuur afgeleid uit Formule 4:

$$T_{\text{stal}} = 0,82 \times T_{\text{KNMI}} + 6,82 \quad \text{Formule 4}$$

Waarbij T_{stal} de temperatuur in de stal (°C) is en T_{KNMI} de temperatuur vanuit KNMI-weerstation Leeuwarden (°C). Deze relatie volgt uit een lineair regressiemodel dat is opgesteld in een periode waarin de temperatuur- en luchtvochtigheidsensoren wel goed functioneerden.

2.1.6 Experimenteel protocol

Elke experimentele periode ($n=3$) verliep volgens hetzelfde protocol zoals weergegeven in Tabel 2.1. In de onderzoeksopzet zijn drie behandelingen toegepast. Ten eerste is het ventilatiedebiet gevarieerd tussen 400 en 2000 $\text{m}^3/\text{dier}/\text{uur}$ om de toepasbaarheid van het CIGR-model bij verschillende ventilatieniveaus te toetsen. Ten tweede is er gemeten met en zonder dieren om een schatting te kunnen maken van de CO₂-productie uit drijfmest. Ten derde is de CO₂-productie bepaald bij een hoog en een laag drijfmestniveau om het effect van drijfmestvolume te kunnen onderzoeken.

Voor een hoog drijfmestniveau is gestreefd naar een volle mestkelder en voor een laag drijfmestniveau is er zoveel mogelijk drijfmest uit de mestkelder gehaald. Omdat het mixen van drijfmest invloed heeft op de CO₂-productie van de drijfmest (VanderZaag et al., 2010) is de drijfmest in de maanden voorafgaand aan een meetperiode niet gemixt. Uiterlijk 3 weken voordat een meetperiode begon is het drijfmestniveau aangepast om te komen tot een hoog drijfmestniveau aan het begin van de nieuwe meetperiode.

Een meetperiode duurde 21 aaneengesloten dagen. Tijdens de eerste 7 dagen is er gemeten met een hoog drijfmestniveau en 100% dierbezetting in de compartimenten. Tussen dag 8 (5:00) en dag 15 (8:00) was de dierbezetting 0% zodat de CO₂-productie uit drijfmest bepaald kon worden. Op dag 12 is het drijfmestniveau aangepast van 'hoog' naar 'laag'. De dagen met wisselingen in dierbezetting of mestniveau zijn niet opgenomen in de analyse, omdat op deze dagen de deuren tussen de compartimenten open stonden en compartimenten elkaar dus konden beïnvloeden.

Het drijfmestniveau is bepaald op dag 1, 8, 15 en 22 van de meetperiode met behulp van een lasermeter. Aanvullend is de drijfmesttemperatuur op 10 plekken per compartiment gemeten op dag 6 en dag 13.

Tabel 2.1 Experimentele opzet van de meetperiodes waarin drie behandelingen, ventilatiedebiet, CO₂ bron en mestniveau zijn gevarieerd. De laatste kolom geeft aan of de meetgegevens zijn meegenomen in de analyses.

	Dag meetperiode	in Ventilatie-debiet [m ³ ·uur ⁻¹ ·dier ⁻¹]	CO ₂ bron	Mestniveau	Gegevens opgenomen in de analyse
Week 1	1	500	Dier + Mest	Hoog	Nee
	2	500	Dier + Mest	Hoog	Ja
	3	1000	Dier + Mest	Hoog	Ja
	4-5	1500	Dier + Mest	Hoog	Ja
	6-7	2000	Dier + Mest	Hoog	Ja
Week 2	1	500	Mest	Hoog	Nee
	2-4	500	Mest	Hoog	Ja
	5	500	Mest	Hoog - Laag	Nee
	6-7	500	Mest	Laag	Ja
Week 3	1	500	Dier + Mest	Laag	Nee
	2	500	Dier + Mest	Laag	Ja
	3-4	1000	Dier + Mest	Laag	Ja
	5-6	1500	Dier + Mest	Laag	Ja
	7	2000	Dier + Mest	Laag	Ja

2.1.7 Drijfmestanalyse

Uit de mestputten van compartimenten A en B zijn mestmonsters genomen op dag 6 van week 1 en op dag 5 van week 2 (zie Tabel 2.1). Elk van de mestmonsters is een mengmonster van 10 monsternamenpunten per compartiment. De mestmonsters zijn geanalyseerd in het laboratorium van Wageningen Livestock Research op droge stof, ruw as, pH, N-totaal-, N-mineraal-, P- en K-gehalte.

2.2 CIGR model: afleiding CO₂-productie en ventilatiedebiet

Het oorspronkelijke CIGR-model is ontwikkeld om de warmteproductie van verschillende diercategorieën te berekenen (CIGR, 2002). Een uitgebreide beschrijving is te vinden in CIGR (2002). In dit model wordt als eerste stap de warmteproductie van een melkkoe ingeschat op basis van diergewicht, melkproductie en drachtijd (Formule 5). Deze warmteproductie wordt gecorrigeerd voor temperaturen buiten de thermo-neutrale zone van de melkkoeien (Formule 6). Vervolgens wordt hieruit de CO₂-productie afgeleid via vermenigvuldiging van de berekende warmteproductie met een CO₂-productiefactor per eenheid warmteproductie. In 2008 hebben Pedersen et al. deze generieke factor vervangen door factoren voor elke diercategorie. De CO₂-productiefactor van een melkkoe stelden zij op 0,18 m³ CO₂ per kW warmteproductie per uur, waaruit vervolgens met Formule 7a de CO₂-productie van een melkkoe kan worden berekend. In deze publicatie hebben Pedersen et al. (2008) ook een berekeningsregel voor de CO₂-productie van drijfmest (Formule 7b), uitgaande van een CO₂-productiefactor voor drijfmest van 0,02 m³ CO₂ per kW warmteproductie per uur. De totale CO₂-productie in een stal wordt berekend door de som van de CO₂-productie uit dier en drijfmest te vermenigvuldigen met het aantal melkkoeien (Formule 8). Tijdens de afwezigheid van de dieren in week 2 van elke meetperiode (zie ook Tabel 2.1), waren de diergegevens wel bekend waarmee de CO₂-productie uit drijfmest is berekend. In dit rapport worden al deze modelleringsstappen samen aangeduid als "het CIGR-model".

$$\text{warmteproductie} = (5,6 \times (m)^{0,75} + 22 \times Y_1 + 1,6 \times 10^{-5} \times p^3) / 1000$$

Formule 5

Met warmteproductie in kW·dier⁻¹, m in kg, Y₁ in kg·dier⁻¹·d⁻¹

$$\text{warmteproductie}_{\text{corr}} = \text{warmteproductie} \times (1000 + 4 \times (20 - T_{\text{stal}})) / 1000$$

Formule 6

Met warmteproductie in $\text{KW} \cdot \text{dier}^{-1}$, T_{stal} in $^{\circ}\text{C}$

$$\text{PCO2}_{\text{melkkoe}} = 0,18 \times \text{warmteproductie}_{\text{corr}}$$

Formule 7a

Met $\text{PCO2}_{\text{melkkoe}}$ in $\text{m}^3 \cdot \text{dier}^{-1} \cdot \text{uur}$ en $\text{warmteproductie}_{\text{corr}}$ in $\text{KW} \cdot \text{dier}^{-1}$

$$\text{PCO2}_{\text{drijfmest}} = 0,02 \times \text{warmteproductie}_{\text{corr}}$$

Formule 7b

Met $\text{PCO2}_{\text{drijfmest}}$ in $\text{m}^3 \cdot \text{dier}^{-1} \cdot \text{uur}^{-1}$ en $\text{warmteproductie}_{\text{corr}}$ in $\text{KW} \cdot \text{dier}^{-1}$

$$\text{PCO2}_{\text{totaal}} = \text{aantal melkkoeien} \times (\text{PCO2}_{\text{melkkoe}} + \text{PCO2}_{\text{drijfmest}})$$

Formule 8

Met $\text{PCO2}_{\text{totaal}}$ in $\text{m}^3 \cdot \text{uur}$, $\text{PCO2}_{\text{melkkoe}}$ in $\text{m}^3 \cdot \text{dier}^{-1} \cdot \text{uur}$ en $\text{PCO2}_{\text{drijfmest}}$ in $\text{m}^3 \cdot \text{dier}^{-1} \cdot \text{uur}^{-1}$

Waarbij T_{stal} de gemiddelde staltemperatuur per dag is, m het diergewicht in kg, Y_1 de melkproductie in kg melk per dier per dag en p de drachttijd in aantal dagen.

Met de berekende CO_2 -productie op volumebasis uit Formule 8 en het gemeten CO_2 -concentratieverschil tussen uitgaande stallucht (C_{uitgaand}) en inkomende buitenlucht (C_{ingaand}) is het ventilatiedebiet (VR) bepaald volgens Formule 9. Het ventilatiedebiet kan ook uitgedrukt worden per dier door het totale ventilatiedebiet te delen door het aantal melkkoeien.

$$\text{VR} = \text{PCO2}_{\text{totaal}} / ((C_{\text{uitgaand}} - C_{\text{ingaand}}) / 10^6)$$

Formule 9

Met VR in $\text{m}^3 \cdot \text{uur}^{-1}$, $\text{PCO2}_{\text{totaal}}$ in $\text{m}^3 \cdot \text{uur}^{-1}$, C_{uitgaand} en C_{ingaand} in ppm

Voor de vergelijking van de CO_2 -productie op massabasis, is Formule 10 toegepast. Omdat het molair volume (MV) afhankelijk is van de temperatuur en luchtdruk, is Formule 2 gebruikt om het MV te berekenen waarin T_{stal} en de luchtdruk als daggemiddelde zijn opgenomen:

$$\text{PCO2}_{\text{totaal}} = \text{PCO2}_{\text{totaal}} \times 1000 \times 44,01 / \text{MV} \times 24$$

Formule 10

Met $\text{PCO2}_{\text{totaal}}$ in $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$ aan de linkerkant van de vergelijking en in $\text{m}^3 \cdot \text{uur}^{-1}$ aan de rechterkant, en MV in $\text{L} \cdot \text{mol}^{-1}$

Het CIGR-model kan op verschillende manieren toegepast worden op basis van de beschikbaarheid van gegevens. In dit onderzoek zijn drie implementatie-methodes onderzocht op basis van het niveau van databeschikbaarheid met de volgende benamingen: dier-specifiek, koppel-specifiek en koppel-standaard. De implementaties zijn als volgt gedefinieerd:

1. **Dier-specifiek** door de CO_2 -productie te berekenen per individueel dier met dierspecifieke gegevens voor gewicht, melkproductie en drachttijd;
2. **Koppel-specifiek** door de CO_2 -productie te berekenen met voor de betreffende stal koppelgemiddelde gegevens voor gewicht, melkproductie en drachttijd;
3. **Koppel-standaard** door de CO_2 -productie te berekenen uit de koppelgemiddelde melkproductie met standaardwaarden voor diergewicht (650 kg) en drachttijd (160 dagen) zoals opgenomen in het meetprotocol (Winkel et al., 2024).

2.3 Statistische analyse

Alle modelberekeningen en statistische analyses zijn uitgevoerd met R4.4.3.

2.3.1 Filteren van gegevens

Om de CO_2 -productie van de melkkoeien goed te kunnen kwantificeren, is het van belang dat interactie tussen de compartimenten uitgesloten is. Daarom zijn dagen en momenten waarop de deuren tussen de compartimenten (zie Figuur 1) geopend waren, uitgesloten van de dataset. Dit betrof de volgende momenten:

- iedere dag tijdens het melken tussen 5:00 en 7:30 en tussen 15:00 en 17:30,
- iedere dag tijdens het aanschuiven van het voer tussen 9:30 en 10:00,
- op dag 1 van iedere meetweek waarop de dieren gecontroleerd werden en
- op dag 5 van meetweek 2 waarop de mest is gemixt en het drijfmestniveau verlaagd.

2.3.2 Validatie ventilatiewaarden: vergelijking model met gemeten stalventilatie

De ventilatie-inschattingen afgeleid uit de drie implementaties van het CIGR-model (paragraaf 2.2) zijn gevalideerd ten opzichte van de verkregen meetwaarden uit het experiment. De mate waarin de voorspelde CIGR-modelwaarden overeenkwamen met de gemeten ventilatiewaarden is onderzocht door berekening van de Pearson correlatiecoëfficiënt (r) en de concordantie correlatiecoëfficiënt (CCC). De r -waarde geeft de lineaire samenhang tussen gemeten en voorspelde waarden weer, variërend tussen -1 en 1, waarbij de uiterste waarden maximale negatieve of positieve samenhang uitdrukken, en 0 het volledig ontbreken van lineaire samenhang uitdrukt. De r -waarde heeft alleen betrekking op lineaire samenhang. De CCC-waarde varieert eveneens tussen -1 en 1. Het geeft niet alleen aan of de waarden van beide reeksen in dezelfde of tegenovergestelde richting lopen maar ook of deze waarden dicht bij elkaar liggen, waarmee ook de precisie van de voorspelde waarden in beeld komt. Naarmate de CCC-waarde 1 nadert komen voorspelling en meting steeds beter overeen.

Naast de mate van samenhang is ook de omvang en het karakter van de waargenomen voorspellingsfouten (meetwaarde – modelpredictie) onderzocht (Bibby & Toutenburg, 1977). De omvang van de voorspellingsfout (RMSPE (%) – Root Mean Square Prediction Error) is daarbij uitgedrukt als percentage van de gemiddeld gemeten waarde en berekend via Formule 11 en 12. De voorspellingsfout kan worden onderverdeeld in drie componenten: een constante model-bias (Formule 13), hellingsfout (Formule 14) en een toevalsfout (Formule 15), allen uitgedrukt als percentage van de voorspellingsfout.

$$MSPE = \sum_{i=1}^n (VR_{\text{gemeten}} - VR_{\text{voorspeld}})^2 / n \quad \text{Formule 11}$$

$$RMSPE = \sqrt{MSPE} / \overline{VR_{\text{gemeten}}} \times 100 \quad \text{Formule 12}$$

$$\text{modelbias} = (\overline{VR_{\text{gemeten}}} - \overline{VR_{\text{voorspeld}}})^2 / MSPE \times 100 \quad \text{Formule 13}$$

$$\text{hellingsfout} = \left(\sqrt{\frac{\sum (VR_{\text{voorspeld}} - \overline{VR_{\text{voorspeld}}})^2}{n}} - r \times \sqrt{\frac{\sum (VR_{\text{gemeten}} - \overline{VR_{\text{gemeten}}})^2}{n}} \right)^2 / MSPE \times 100 \quad \text{Formule 14}$$

$$\text{toevalsfout} = \left((1 - r^2) \times \sqrt{\frac{\sum (VR_{\text{voorspeld}} - \overline{VR_{\text{voorspeld}}})^2}{n}} \right)^2 / MSPE \times 100 \quad \text{Formule 15}$$

De model-bias en de hellingsfout hebben beide een systematisch karakter. Het percentage model-bias is het aandeel in de voorspellingsfout van het gemiddelde niveauverschil tussen model- en meetwaarden. De hellingsfout geeft aan in hoeverre de regressiecoëfficiënt afwijkt van 1 bij lineaire regressie van voorspelde waarden op meetwaarden. Afwijking van 1 betekent dat de proportionele samenhang tussen beide variabelen niet constant is, maar geleidelijk toe of afneemt. Het resterende percentage in de voorspellingsfout is de toevalsfout gebaseerd op afwijkingen veroorzaakt door toevalsfactoren.

Ter ondersteuning van de interpretatie van bovengenoemde voorspellingsfouten zijn voor de drie implementaties lineaire regressies uitgevoerd volgens het model $y = a + bx$, met y = meetwaarden en x = voorspelde waarden.

2.3.3 Autocorrelatie tussen de metingen

Omdat de CO₂-producties van opeenvolgende meetdagen aan elkaar gecorreleerd zijn, is de gemeten CO₂-productie geaggregeerd naar week-mesthoogteniveau. Het aantal waarnemingen komt daarmee in totaal op 2 compartimenten × 3 meetperioden × 2 mestniveaus × 2 CO₂-bronnen = 24 waarnemingen. Voor de

gemeten ventilatieniveaus speelt autocorrelatie geen rol, omdat de compartimenten mechanisch geventileerd zijn en daarmee (min of meer) onafhankelijk van externe omstandigheden. Het aantal observaties voor de ventilatieniveaus is 2 compartimenten × 3 meetperioden × 15 meetdagen = 90 waarnemingen.

2.3.4 Differentiatie van CO₂-bronnen

Het CIGR-model maakt een voorspelling van de CO₂-productie uit zowel het dier als de drijfmest waarbij wordt aangenomen dat de CO₂-productie uit drijfmest 10% van de CO₂-productie uit dier en drijfmest beslaat. De voorspelde CO₂-productie kan daarmee worden uitgesplitst naar dier en drijfmest. Om de modelcomponenten 'dier' en 'drijfmest' onafhankelijk van elkaar te kunnen toetsen, zijn ook de gemeten CO₂-producties opgesplitst in 'dier' en 'drijfmest'. Om de gemeten CO₂-productie van het dier te bepalen, is de CO₂-productie uit drijfmest bij een hoog en een laag drijfmestniveau in mindering gebracht op de totaal gemeten CO₂-productie in meetweek 1 en meetweek 3.

2.3.5 Modelverbetering

Op basis van de verkregen experimentele resultaten zijn voor beide modelcomponenten aanpassingen om de nauwkeurigheid van de geschatte CO₂-productie te verbeteren. Voor de drijfmest-component is hiervoor het effect van temperatuur op de productie onderzocht waarbij de eigen dataset is aangevuld met literatuurgegevens. Met behulp van een lineair regressiemodel is uit deze dataset een relatie met buitentemperatuur vastgesteld.

De diercomponent van het model is verbeterd door een veld-kalibratie van het model op de meetwaarden. Hiervoor is een lineaire regressie uitgevoerd van berekende ventilatie-waarden volgens het huidige CIGR-model op de gemeten ventilatie in de onderzoeksafdelingen. Het verbeterde model kan hieruit worden beschreven met Formule 16 waarbij VR_{melkkoe} is gebaseerd op huidige rekenregels voor de CO₂-productie van een lacterende melkkoe (Formules 5, 6 en 10). Dit voorspelde ventilatiedebiet is gecorrigeerd met snijpunt b en richtingscoëfficiënt a . Hieraan wordt de ventilatiecomponent $VR_{\text{drijfmest}}$ toegevoegd op basis van een vernieuwd model voor de CO₂-productie uit drijfmest. Het resulterende ventilatiedebiet is daarin uitgedrukt in m³ per dier per uur.

$$VR_{\text{totaal}} = b + a \times VR_{\text{melkkoe}} + VR_{\text{drijfmest}}/\text{aantal melkkoeien}$$

Formule 16

Met VR_{totaal} in m³·dier⁻¹·uur⁻¹, VR_{melkkoe} in m³·uur⁻¹·dier⁻¹ en $VR_{\text{drijfmest}}$ in m³·uur⁻¹

3 Resultaten en discussie

3.1 Dierkenmerken

In Tabel 3.1 zijn de gemiddelde dierkenmerken per meetperiode en drijfmestniveau binnen meetperiode weergegeven. Gedurende de drie meetperioden was het gemiddelde gewicht van de dieren respectievelijk 606 kg, 579 kg en 651 kg, de gemiddelde melkproductie per koe 35 kg·dag⁻¹, 29 kg·dag⁻¹ en 33 kg·dag⁻¹ en de gemiddelde drachttijd 35, 90 en 33 dagen. Hieruit blijkt dat meetperiode 2 op elk van de drie genoemde dierkenmerken afwijkend was van de andere twee meetperioden. Uit Tabel 3.1 blijkt dat het CIGR-model is gevalideerd bij gemiddelde diergewichten op koppelniveau variërend tussen 573 en 664 kg, gemiddelde melkproducties tussen 26,4 en 34,8 kg·dag⁻¹ en gemiddelde drachttijden tussen 30 en 101 dagen. Dit is naar verwachting representatief voor melkveebedrijven in Nederland. Bij de toepassing van het CIGR-model in niet-onderzoeksbedrijven zijn diergewichten en drachttijden vaak onbekend of lastig te achterhalen, waardoor er met standaardwaarden voor gewicht en drachttijd van respectievelijk 650 kg en 160 dagen wordt gerekend (Werkgroep richtlijnen emissies veehouderij, 2024).

Tabel 3.1 Het gemiddelde ($\pm$ standaardfout) voor dierkenmerken (lichaamsgewicht, melkproductie, melksamenstelling en drachttijd) tijdens de drie meetperioden en twee mestniveaus binnen de meetperioden. De dierkenmerken lichaamsgewicht, melkproductie en drachttijd zijn inputparameters van het CIGR-model.

Meet- periode	Drijfmest- niveau	Compart.	Gewicht [kg]	Melkproductie [kg·dag ⁻¹]	Melksamenstelling			Drachttijd [dagen]
					Vet [kg·dag ⁻¹]	Eiwit [%]	Lactose [%]	
1	Hoog	A	579 (± 10)	34.8 (± 1.3)	4.35 (± 0.14)	3.44 (± 0.07)	4.47 (± 0.04)	31 (± 7)
		B	622 (± 16)	34.7 (± 1.5)	4.34 (± 0.13)	3.44 (± 0.06)	4.49 (± 0.03)	30 (± 8)
	Laag	A	589 (± 10)	34.2 (± 1.3)	4.30 (± 0.14)	3.51 (± 0.06)	4.52 (± 0.04)	40 (± 7)
		B	631 (± 16)	34.9 (± 1.5)	4.38 (± 0.13)	3.50 (± 0.06)	4.53 (± 0.03)	40 (± 9)
2	Hoog	A	586 (± 16)	31.3 (± 1.3)	4.48 (± 0.11)	3.31 (± 0.06)	4.49 (± 0.03)	94 (± 18)
		B	578 (± 13)	29.6 (± 1.4)	4.54 (± 0.12)	3.45 (± 0.08)	4.47 (± 0.04)	79 (± 16)
	Laag	A	579 (± 16)	28.3 (± 1.2)	4.41 (± 0.13)	3.26 (± 0.06)	4.49 (± 0.03)	101 (± 19)
		B	573 (± 13)	26.4 (± 1.3)	4.33 (± 0.11)	3.27 (± 0.07)	4.47 (± 0.04)	86 (± 19)
3	Hoog	A	638 (± 18)	33.1 (± 1.8)	4.67 (± 0.13)	3.72 (± 0.07)	4.49 (± 0.04)	33 (± 9)
		B	659 (± 19)	34.9 (± 2.5)	4.56 (± 0.19)	3.53 (± 0.08)	4.45 (± 0.05)	21 (± 10)
	Laag	A	644 (± 17)	30.8 (± 1.6)	4.67 (± 0.14)	3.71 (± 0.07)	4.48 (± 0.04)	48 (± 10)
		B	664 (± 20)	34.1 (± 2.5)	4.50 (± 0.19)	3.57 (± 0.09)	4.52 (± 0.05)	30 (± 12)

3.2 Modelvalidatie voor CO₂-productie

De inputparameters diergewicht, melkproductie en drachttijd kunnen op drie aggregatieniveaus beschikbaar zijn (zie ook par. 2.2): op het niveau van een individuele koe ("dier-specifiek"), op het niveau van een koppel/stal/bedrijf ("koppel-specifiek") of op het niveau van de Nederlandse melkveehouderij ("koppel-standaard"; met een landelijk gemiddeld cijfer voor lichaamsgewicht en drachttijd). Omdat de inputparameters in deze studie op dierniveau bekend zijn, kunnen elk van de drie aggregatieniveaus

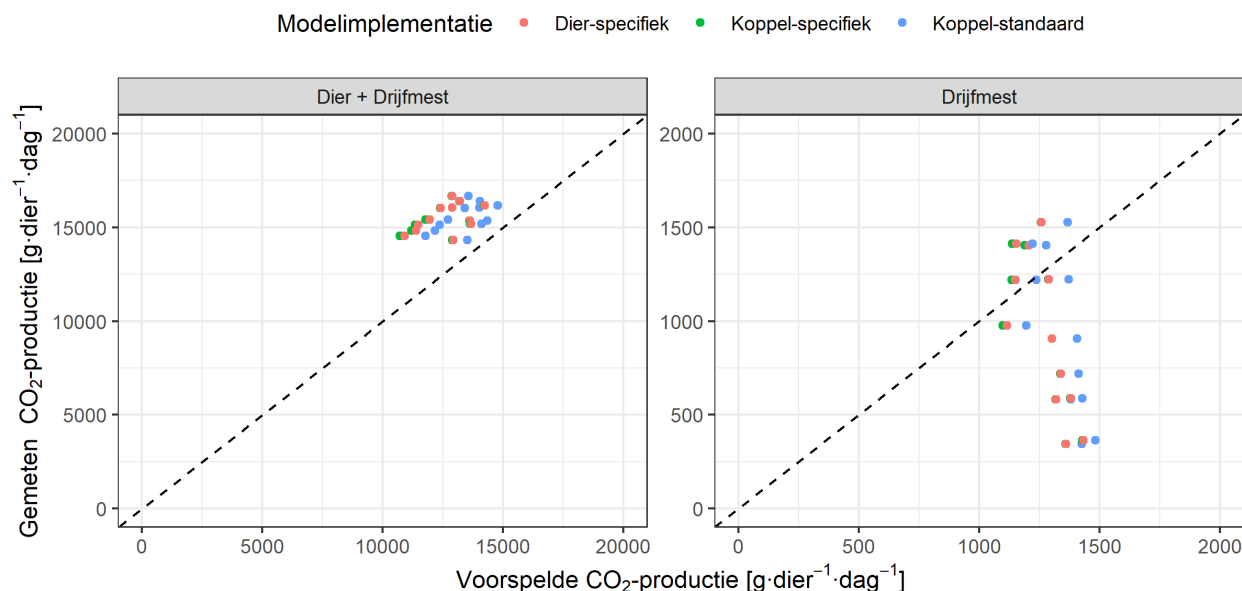
individueel worden doorgerekend met het CIGR-model waarna de modeluitkomsten daarvan met de gemeten CO₂-producties kunnen worden vergeleken. Tabel 3.2 toont de modelresultaten van de doorrekeningen op de drie aggregatieniveaus. Bij elk van de drie aggregatieniveaus onderschat het CIGR-model de CO₂-productie wanneer de dieren in de stal aanwezig zijn (gemiddeld 23%, 24% en 16% voor respectievelijk dier-specifiek, koppel-specifiek en koppel-standaard). In Figuur 3.1 zijn de cijfers uit Tabel 3.2 grafisch weergegeven.

Bij een CO₂-productie uit zowel dier als drijfmest, wordt de CO₂ productie in elk van de meetperioden onderschat. De mate van onderschatting varieert tussen meetperioden, mogelijk als gevolg van variaties in omgevingseigenschappen (zoals seizoen, temperatuur). Uit Tabel 3.2 blijkt dat de CO₂-productieschattingen van de aggregatieniveaus dier-specifiek en koppel-specifiek nagenoeg overeenkomen. Aggregatieniveau koppel-standaard heeft een hogere schatting van de CO₂-productie en daarmee een lagere voorspellingsfout.

Bij een CO₂-productie uit alleen drijfmest, overschat het CIGR-model de CO₂-productie in meetperiode 1 en 3, maar onderschat het in meetperiode 2. Gemiddeld over de drie meetperioden overschat het model de CO₂-productie uit drijfmest met respectievelijk 24%, 24% en 28% voor de drie genoemde aggregatieniveaus. De CO₂-productie van drijfmest bedraagt gemiddeld 6% (range: 2,4 tot 9,5%) van de aan de totale CO₂-productie op stalniveau (Dier + Drijfmest in Tabel 3.2). Daarom leidt de overschatting van de CO₂-productie uit drijfmest tot een fout van slechts 2% tot 2,5% op stalniveau. Wel lijkt de hypothese dat de CO₂-productie uit drijfmest niet altijd 10% van de totale CO₂-productie bedraagt, te worden bevestigd. Literatuuronderzoek wijst uit dat de CO₂-productie uit drijfmest onder andere gerelateerd is aan de microbiële activiteit die weer gerelateerd is aan de drijfmesttemperatuur (Misselbrook et al., 2016; VanderZaag et al., 2010). Daarnaast is de totale CO₂-productie ook afhankelijk van de hoeveelheid beschikbare organische stof dat mede afhangt van het mestvolume. Vanderzaag et al. (2010) toonde aan dat een deel van de CO₂ in gasbelletjes in de mest aanwezig is als bijproduct van de vorming van methaan. De CO₂ opgeslagen in gasbelletjes, komt tijdens het mixen van de mest vrij en leidt dan tot CO₂-producties uit de drijfmest die tot driemaal hoger zijn dan tijdens de periode voorafgaand aan het mixen (VanderZaag et al., 2010). Drijfmesttemperatuur, drijfmestvolume en mixfrequentie zijn daarmee drijfmesteigenschappen op basis waarvan de modelvoorspelling verbeterd kan worden.

Tabel 3.2 Gemeten en voorspelde CO₂-productieniveaus uitgesplitst naar meetperiode, behandeling, en compartiment. De voorspelde CO₂-productie is weergegeven per implementatiemethode van het CIGR-model (dier-specifiek, koppel-specifiek en koppel-standaard).

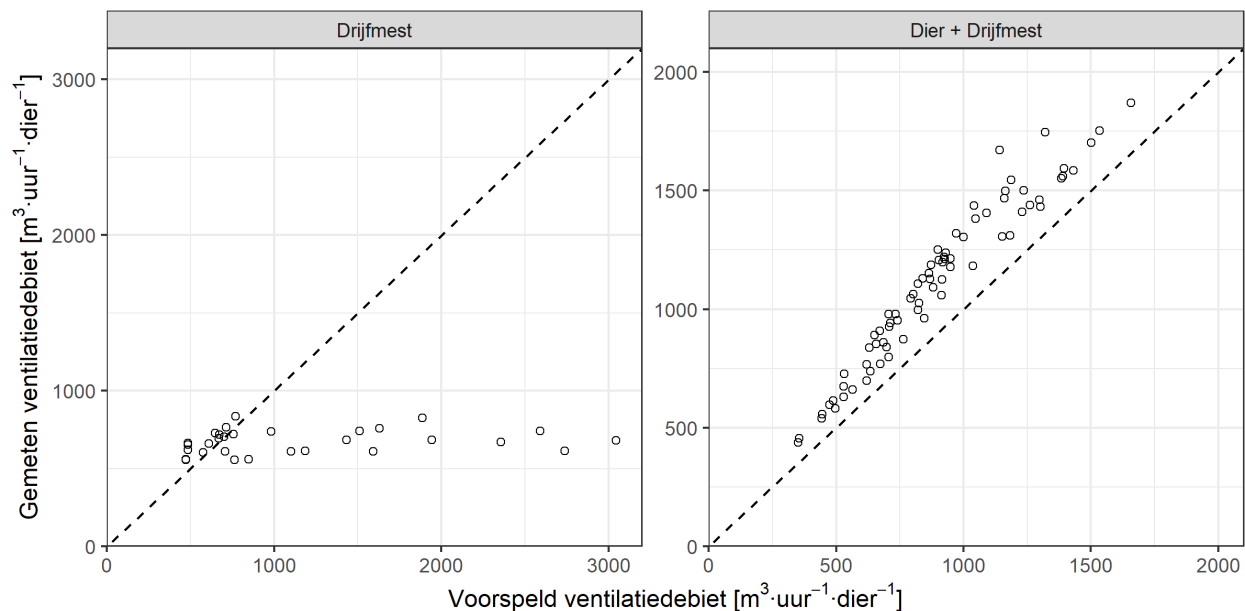
CO ₂ bron	Meet-periode	Drijfmest-niveau	Compart.	CO ₂ gemeten [g·dier ⁻¹ ·dag ⁻¹]	CO ₂ voorspeld		
					Dier-specifiek [g·dier ⁻¹ ·dag ⁻¹]	Koppel-specifiek [g·dier ⁻¹ ·dag ⁻¹]	Koppel-standaard [g·dier ⁻¹ ·dag ⁻¹]
Dier + Drijfmest	1	Hoog	A	16042	12890 (-24%)	12896 (-24%)	14013 (-14%)
			B	16388	13188 (-24%)	13205 (-24%)	14045 (-17%)
		Laag	A	16031	12399 (-29%)	12411 (-29%)	13416 (-19%)
			B	16684	12873 (-30%)	12897 (-29%)	13564 (-23%)
	2	Hoog	A	15412	11789 (-31%)	11948 (-29%)	12714 (-21%)
			B	15147	11342 (-34%)	11475 (-32%)	12373 (-22%)
		Laag	A	14825	11190 (-32%)	11398 (-30%)	12162 (-22%)
			B	14540	10719 (-36%)	10904 (-33%)	11786 (-23%)
	3	Hoog	A	15356	13616 (-13%)	13638 (-13%)	14350 (-7%)
			B	16178	14217 (-14%)	14245 (-14%)	14782 (-9%)
		Laag	A	14329	12898 (-11%)	12937 (-11%)	13526 (-6%)
			B	15194	13632 (-11%)	13677 (-11%)	14115 (-8%)
Drijfmest	1	Hoog	A	1528	1258 (-21%)	1259 (-21%)	1368 (-12%)
			B	1222	1287 (5%)	1289 (5%)	1373 (11%)
		Laag	A	906	1303 (30%)	1304 (31%)	1407 (36%)
			B	720	1338 (46%)	1341 (46%)	1414 (49%)
	2	Hoog	A	1405	1189 (-18%)	1207 (-16%)	1279 (-10%)
			B	1219	1135 (-7%)	1150 (-6%)	1237 (1%)
		Laag	A	1413	1137 (-24%)	1155 (-22%)	1223 (-16%)
			B	977	1099 (11%)	1116 (12%)	1196 (18%)
	3	Hoog	A	581	1318 (56%)	1320 (56%)	1381 (58%)
			B	588	1379 (57%)	1382 (57%)	1430 (59%)
		Laag	A	344	1359 (75%)	1362 (75%)	1426 (76%)
			B	363	1430 (75%)	1434 (75%)	1484 (76%)



Figuur 3.1 De gemeten CO_2 -productie in $g \cdot dier^{-1} \cdot dag^{-1}$ per meetperiode-mesthoogte combinatie uitgezet tegen de voorspelde CO_2 -productie in dezelfde periode. Modelvoorspelling van drie aggregatieniveaus van het CIGR-model (dier-specifiek, koppel-specifiek en koppel-standaard) zijn uitgesplitst naar de CO_2 -bron met stal + drijfmest (links) en enkel drijfmest (rechts). De $y=x$ lijn is weergegeven als gestreepte lijn. NB: de verticale schaal verschilt een factor 10 tussen beide grafieken.

3.3 Modelvalidatie voor ventilatiedebiet

Bij gebruik van het CIGR-model voor berekening van het ventilatiedebiet leidt een onderschatting van de CO_2 -productie tot een proportionele onderschatting van het ventilatiedebiet (zie Formule 9). Het gemeten en het voorspelde ventilatiedebiet per modelimplementatie zijn ook opgenomen in Bijlage 1. Figuur 3.2 toont de relatie tussen het voorspelde ventilatiedebiet op de x-as en het gemeten ventilatiedebiet op de y-as voor het aggregatieniveau dier-specifiek. Allereerst blijkt uit Figuur 3.2 dat de ventilatieschatting op basis van enkel de CO_2 -productie uit drijfmest foutgevoeliger is dan de ventilatieschatting op basis van CO_2 -productie uit drijfmest en dier. Ten tweede blijkt dat het berekende ventilatiedebiet bij dier + drijfmest systematisch lager is dan het gemeten ventilatiedebiet. De hellingshoek van de relatie ligt dicht bij een 1:1-relatie, maar er lijkt sprake van een vaste offset over de hele range van waarden. Dit is het gevolg van de onderschatting van de CO_2 -productie zoals gepresenteerd in Tabel 3.2.



Figuur 3.2 Het gemeten ventilatiedebiet als daggemiddelde uitgezet tegen het voorspelde ventilatiedebiet op dagbasis van het aggregatieniveau dier-specifiek van het CIGR-model, op basis van de CO₂-productie uit drijfmest (links) en op basis van de CO₂-productie uit dier en drijfmest (rechts). De $y=x$ lijn is weergegeven als gestreepte lijn.

De modelprestaties voor elk van de drie aggregatieniveaus zijn gekwantificeerd in Tabel 3.3. De prestatie is daarin beoordeeld op de voorspellende waarde van de CO₂-productie op stalniveau (dier + drijfmest) alsook uit drijfmest alleen. De laagste voorspellingsfout (RMSPE) is 20% voor het aggregatieniveau koppel-standaard bij aanwezigheid van de melkkoeien. Voor zowel dier-specifiek als koppel-specifiek is de voorspellingsfout van het ventilatiedebiet bij aanwezigheid van de melkkoeien 25%. Verwacht werd dat de voorspellingsfout zou afnemen met de aggregatieniveaus koppel-standaard, koppel-specifiek en dier-specifiek omdat er steeds accuratere waarden voor lichaamsgewicht, melkproductie en drachtijd worden gebruikt. Uit Tabel 3.3 blijkt echter dat dier-specifiek en koppel-specifiek geen toegevoegde waarde hebben ten opzichte van koppel-standaard. Dit wijst er op dat er niet of nauwelijks een effect is van variatie in diergewicht en drachtijd op de gemeten CO₂-productie.

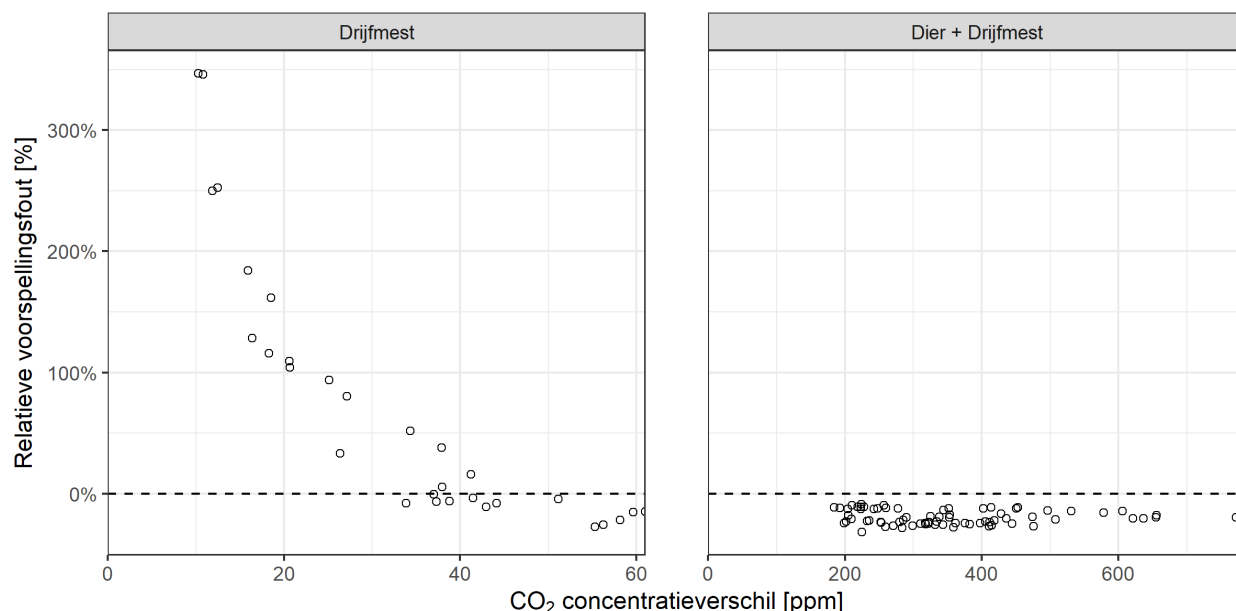
De voorspellingsfout op stalniveau voor de drie aggregatieniveaus wordt voor 86% tot 87% verklaard door de bias-constante van het model. Dit betekent dat met toevoeging van een constante correctiewaarde (gelijk aan het verschil tussen de gemiddelde meetwaarden en gemiddelde modelresultaten) de modelresultaten op stalniveau flink verbeterd kunnen worden.

Het voorspelde ventilatieniveau op basis van enkel de CO₂-productie uit drijfmest heeft met 121% tot 128% een zeer grote voorspellingsfout. Dit is ook zichtbaar in Figuur 3.2. De voorspellingsfout wordt voor het grootste deel veroorzaakt door de hellingsfout die veel groter is dan de hellingsfout van de bron (drijfmest + dier). Dit vertaalt zich in een zeer lage concordantiecoëfficiënt (CCC) van 0,03 die aangeeft dat er bij CO₂-bron drijfmest praktisch geen samenhang is tussen schatting en meting. De richtingscoëfficiënt is niet significant verschillend van nul ($P > 0,05$). Voor een goede relatie zou de richtingscoëfficiënt zo dicht mogelijk de waarde 1 moeten naderen.

Tabel 3.3 Concordantiestatistieken van de voorspelling van het ventilatiedebiet met drie verschillende aggregatieniveaus van het CIGR model berekend voor twee bronnen van CO₂-productie (drijfmest + dier en alleen drijfmest).

Model-implementatie	CO ₂ bron	Gemeten ventilatie [m ³ ·dier ⁻¹ ·uur ⁻¹]	Voorspelde ventilatie [m ³ ·dier ⁻¹ ·uur ⁻¹]	RMSPE [%]	Bias-C [%]	Hellingsfout [%]	Toevalsfout [%]	Correlatie (r)	CCC	Richtingscoëfficiënt (±SE)
Dier-specifiek	Drijfmest	672 (±14)	1161 (±136)	130	31	68	1	0.20	0.03	0.02 (±0.02)
Dier-specifiek	Dier + Drijfmest	1112 (±40)	897 (±35)	21	85	2	13	0.97	0.79	1.11 (±0.03)*
Koppel-specifiek	Drijfmest	672 (±14)	1156 (±136)	129	31	68	1	0.20	0.03	0.02 (±0.02)
Koppel-specifiek	Dier + Drijfmest	1112 (±40)	892 (±35)	22	84	2	14	0.97	0.77	1.12 (±0.04)*
Koppel-standaard	Drijfmest	672 (±14)	1221 (±140)	138	35	64	1	0.20	0.03	0.02 (±0.02)
Koppel-standaard	Dier + Drijfmest	1112 (±40)	951 (±36)	16	81	2	17	0.98	0.87	1.08 (±0.03)*

De grote voorspellingsfout van het ventilatiedebiet op basis van de CO₂-productie uit drijfmest is niet alleen het gevolg van een modelfout. Ook een meetfout in de CO₂-concentratie van de ingaande óf uitgaande lucht kan een grote invloed hebben. Dit komt doordat de CO₂-productie uit drijfmest slechts 2-10% (zie par. 3.2) van de totale CO₂-productie op stalniveau omvat. Wanneer dan de dieren uit de stal worden gehaald daalt de CO₂-concentratie in de uitgaande lucht van de stal terwijl die van de ingaande concentratie ongeveer gelijk blijft. Dus wordt het CO₂-concentratieverschil tussen ingaande en uitgaande lucht daarmee kleiner. Het CO₂-concentratieverschil daalt dan van 600-800 ppm naar 10-60 ppm. In Figuur 3.3 is daarom de voorspellingsfout uitgezet tegen het CO₂-concentratieverschil. Figuur 3.3 maakt duidelijk dat de voorspellingsfout voor drijfmest exponentieel kleiner wordt naar mate het CO₂-concentratieverschil toeneemt. Dit onderstreept het belang van enerzijds een accurate schatting van de CO₂-productie en anderzijds een betrouwbare bepaling van het CO₂-concentratieverschil. Omdat de CO₂-productie uit drijfmest beperkt is, is ook het concentratieverschil klein wanneer drijfmest de enige bron van CO₂ in de stal is. Het risico op misschattingen is daarmee groter.



Figuur 3.3 Relatieve voorspellingsfout in relatie tot het gemeten CO₂-concentratieverschil tussen ingaande en uitgaande lucht voor de CO₂-productiebronnen drijfmest (links) en dier + drijfmest (rechts).

3.4 Verbetering schatting CO₂-productie uit drijfmest

De tot nu toe gepresenteerde resultaten laten zien dat het CIGR-model op stalniveau, met name op basis van de sterke correlatie tussen voorspeld en gemeten ventilatiedebiet, de potentie heeft om het ventilatieniveau goed te schatten. Op het niveau van drijfmest is er echter geen samenhang tussen voorspelde en gemeten waarden. Met het CIGR-model schat men echter de CO₂-productie van een melkkoe op basis van haar lichaamsgewicht, melkproductie en drachtijd (Formule 5). Deze CO₂-productie wordt op dierniveau vermeerderd met 10% als bijdrage van drijfmest aan de totale CO₂-productie (Formule 7b). Dit betekent dat de bijdrage van drijfmest op een zeer eenvoudige manier (namelijk als vast percentage van de dierproductie) is opgenomen. Een mogelijkheid is om deze rekenstap te vervangen door een drijfmestmodel voor CO₂-productie. Echter, omdat de CO₂-productie uit drijfmest in deze studie slechts 2% tot 10% van de totale CO₂-productie op stalniveau omvat, zal de betrouwbaarheid van het ventilatiedebiet op stalniveau slechts beperkt toenemen door de implementatie van een goed presterend drijfmestmodel. Wanneer echter de CO₂-productie uit drijfmest wordt benut om het ventilatiedebiet te schatten bij afwezigheid van de dieren is een dergelijk model essentieel.

Drijfmestkenmerken zoals volume, temperatuur, pH, samenstelling of behandelingen zoals mixen zijn gecorreleerd met de CO₂-productie uit drijfmest (VanderZaag et al., 2010). De huidige studie bevat echter te weinig waarnemingen en te weinig variatie in de genoemde drijfmestkenmerken om een volledig onderbouwd model op te kunnen stellen voor de CO₂-productie uit drijfmest. Gemiddeld ($\pm$ SE) over de drie meetperioden bedroeg de CO₂-productie uit de drijfmest $8,42 \pm 1,9 \text{ g}\cdot\text{uur}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ drijfmest bij een gemiddelde buitentemperatuur van $12,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$. In de onderzoeken die zijn uitgevoerd door Misselbrook et al. (2016) en Vanderzaag et al. (2010) zijn gemiddelde CO₂-producties gerapporteerd van respectievelijk $12,6 \text{ g}\cdot\text{uur}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ drijfmest en $2,3 \text{ g}\cdot\text{uur}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ drijfmest bij gemiddelde buitentemperaturen van respectievelijk $11,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ en $0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Qua omstandigheden is de onze studie daarmee het meest vergelijkbaar met Misselbrook et al. (2016) en de resultaten uit onze studie komen daarmee qua orde van grootte ook het best overeen.

Om de CO₂-productie in liter per uur per m³ drijfmest beter te kunnen voorspellen is met een regressieanalyse de relatie met buitentemperatuur onderzocht in de dataset uit de onderhavige studie, met daaraan toegevoegd de data uit Vanderzaag et al. (2010) en Misselbrook et al. (2016). In Figuur 3.4 staan de datapunten en de regressielijn weergegeven. De lineaire regressie in deze figuur is een vereenvoudigde voorstelling van de relatie tussen de CO₂-productie van drijfmest en de omgevingstemperatuur. Op dit moment zijn er onvoldoende gegevens om een betere schatting van deze relatie te maken. Met meer

schattingen van de CO₂-productie van drijfmest bij een breder temperatuurbereik is een betere schatting van deze relatie mogelijk. De regressielijn resulteert in een verklaarde variantie van 56%. Het hieruit volgende model voor de CO₂-productie uit drijfmest is beschreven in Formule 17. Verwacht wordt dat gebruik van de drijfmesttemperatuur in plaats van de buitentemperatuur zal leiden tot een hogere verklaarde variantie vanwege een meer directe invloed op de microbiële processen in de drijfmest. Gegevens over de mesttemperatuur zijn echter niet gerapporteerd in de hiervoor genoemde studies en worden ook in de veehouderijpraktijk niet routinematig gemeten zodat we hier de buitentemperatuur als invloedsfactor hebben gekozen. Het ventilatiedebiet volgend uit de CO₂-productie van drijfmest wordt berekend met Formule 18.

$$PCO_{2\text{drijfmest}} = (-0,27 + 0,43 \times \text{buitentemperatuur}) \times \text{mestvolume} / 1000$$

Formule 17

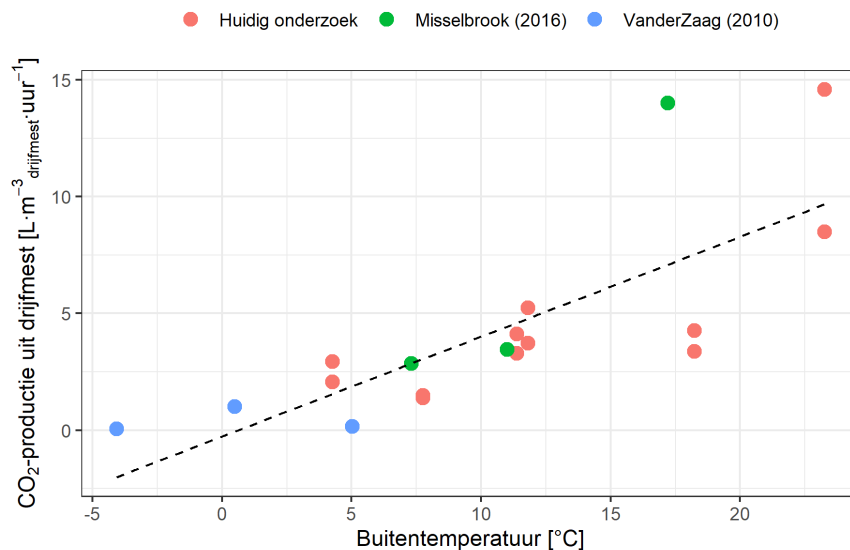
Met $PCO_{2\text{drijfmest}}$ in $m^3 \cdot \text{uur}^{-1}$, buitentemperatuur in $^{\circ}\text{C}$ en mestvolume in m^3

$$VR_{\text{drijfmest}} = PCO_{2\text{drijfmest}} / ((C_{\text{uitgaand}} - C_{\text{ingaand}}) / 10^6)$$

Formule 18

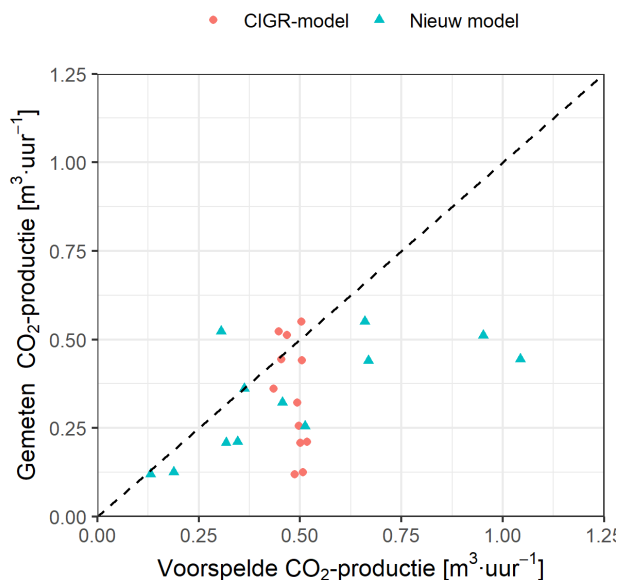
Met $VR_{\text{drijfmest}}$ in $m^3 \cdot \text{uur}^{-1}$, $PCO_{2\text{drijfmest}}$ in $m^3 \cdot \text{uur}^{-1}$, C_{uitgaand} en C_{ingaand} in ppm

Via Formule 18 is op basis van de gemodelleerde CO₂-productie uit drijfmest de ventilatiecomponent 'drijfmest' berekend.



Figuur 3.4 Regressie-analyse van de CO₂-productie uit drijfmest tegen de buitentemperatuur, gebruik makend van de datapunten uit de onderhavige studie alsook die van Misselbrook et al. (2016) en VanderZaag et al. (2010).

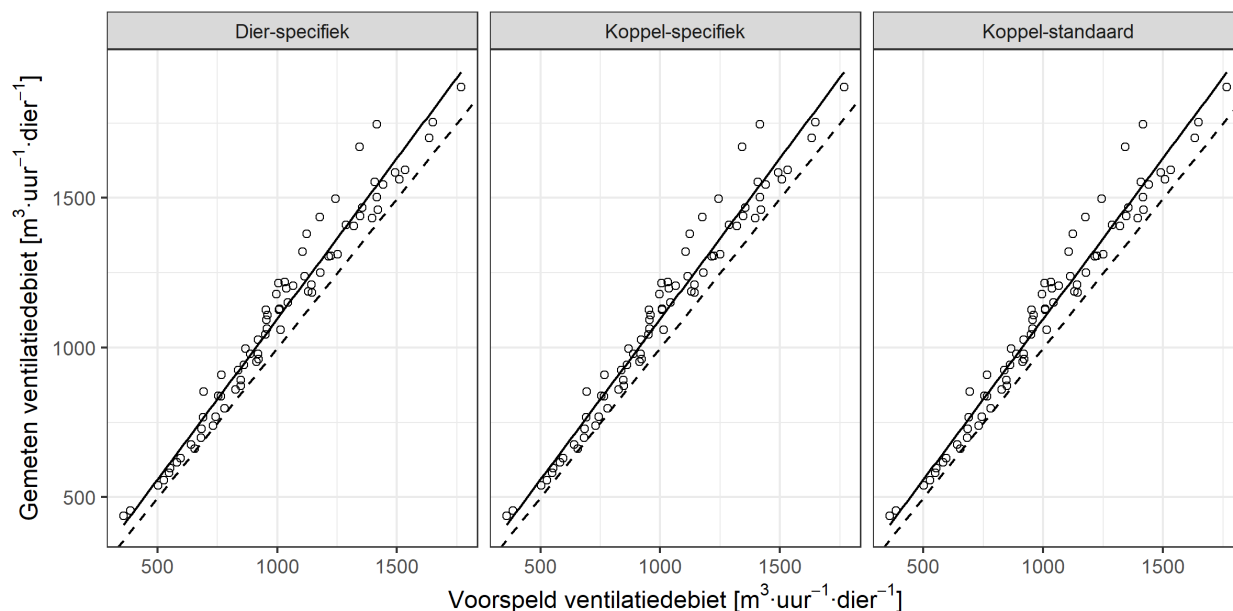
In Figuur 3.5 zijn de modelvoorspellingen van het vernieuwde CO₂-productiemodel en het CIGR-model (op basis van aggregatieniveau koppel-standaard) uitgezet tegen de gemeten CO₂-producties. Hieruit wordt zichtbaar dat het vernieuwde model in staat is meer variatie in CO₂-productie uit drijfmest te ondervangen dan het CIGR-model. Desalniettemin wordt de CO₂-productie uit drijfmest ook met het vernieuwde model in sommige gevallen nog tot een factor 2 overschat.



Figuur 3.5 Voorspelde CO₂-productie uit drijfmest in m³ CO₂ per uur van het CIGR-model en het vernieuwde model uitgezet tegen de CO₂-productie op basis van metingen. De y=x lijn is weergegeven als gestreepte lijn.

3.5 Verbetering schatting ventilatiedebiet op basis van de CO₂-productie van melkkoeien

Om te komen tot een modelverbetering voor de ventilatiecomponent 'dier' is een lineair regressiemodel opgesteld per modelimplementatie. Als eerste zijn hiervoor de oorspronkelijke rekenregels (Formule 5, 8 en 10) toegepast om het ventilatieniveau op basis van de CO₂-productie uit het dier te berekenen. Als tweede is de ventilatiecomponent voor drijfmest berekend met het vernieuwde model zoals beschreven met Formule 17 en 18. Door de ventilatiecomponent voor drijfmest in mindering te brengen op de gemeten totale ventilatie is de gemeten ventilatiecomponent 'dier' verkregen. De regressie-analyse is gevisualiseerd in Figuur 3.6 en de correcties staan per modelimplementatie beschreven in Formules 19-21.



Figuur 3.6 Regressie-analyse op de relatie tussen het voorspelde ventilatieniveau en het gemeten ventilatieniveau voor drie modelimplementaties (A: dier-specifiek; B: koppel-specifiek; C: koppel-standaard). De regressielijn is weergegeven als doorgetrokken lijn en de $y=x$ lijn als gestreepte lijn.

Dier-specifiek: $VR_{melkkoe} = 88 + 1,15 (\pm 0,03) \times VR_{melkkoe}$

Formule 19

Koppel-specifiek: $VR_{melkkoe} = 89 + 1,15 (\pm 0,03) \times VR_{melkkoe}$

Formule 20

Koppel-standaard: $VR_{melkkoe} = 67 + 1,11 (\pm 0,02) \times VR_{melkkoe}$

Formule 21

Met $VR_{melkkoe}$ in $m^3 \cdot dier^{-1} \cdot uur^{-1}$

Het totaal voorspelde debiet is berekend door VR_{dier} en $VR_{drijfmest}$ te sommeren zoals ook beschreven met Formule 16. Om de prestaties van de verbeterde modelcomponenten te beoordelen, zijn de concordantiestatistieken opnieuw berekend en weergegeven in Tabel 3.4.

Uit de analyse blijkt dat de drijfmestcomponent beter presteert maar veel ruimte overlaat voor verbetering. Ondanks een daling van RMSPE (van 130% naar 75%), een verwaarloosbare toename van CCC (van 0,03 naar 0,16) en een toename van de correlatie (van 0,20 naar 0,69), blijven de correlatieniveaus nog steeds laag en kennen de voorspellingen een hoge regressiefout (65%). Dit betekent dat, hoewel het verbeterde model voor de CO_2 -productie uit drijfmest leidt tot nauwkeurigere voorspellingen, dit nog niet nauwkeurig genoeg is om het ventilatieniveau te baseren op enkel de CO_2 -productie uit drijfmest. Hierin speelt ook mee dat de geringe CO_2 -productie uit drijfmest leidt tot een laag concentratieverschil tussen inkomende en uitgaande lucht met gemiddeld ($\pm$ SD) 33 ± 16 ppm waardoor het berekende ventilatiedebiet erg gevoelig is voor de meetonzekerheid van het concentratieverschil en de schattingsfout van de CO_2 -productie.

Op stalniveau (dier + drijfmest) wordt het ventilatieniveau nauwkeurig voorspeld met een correlatie van 0,99 en concordantiecorrelatie van 0,99. Deze modellen hebben een RMSPE van 5-6% die volledig te verklaren zijn uit toevalsfouten. Dit is te verklaren doordat de modelbias geëlimineerd is via de toegepaste modelkalibratie. Het 'koppel-standaard'-model, zoals veelal toegepast in de praktijk, resulteert in de hoogste nauwkeurigheid.

Tabel 3.4 Concordantiestatistieken van de aangepaste modellen voor CO₂-productie uit mest en bij een volledige stalbezetting.

Model	CO ₂ bron	Gemeten ventilatie [m ³ ·uur ⁻¹ ·dier ⁻¹]	Voorspelde ventilatie [m ³ ·uur ⁻¹ ·dier ⁻¹]	RMSPE [%]	Model bias [%]	Regressie fout [%]	Willekeurige fout [%]	Correlatie	CCC	Richtings-coëfficiënt (±SE)
Dier-specifiek	Drijfmest	706 (±15)	966 (±85)	75	34	65	1	0.69	0.16	0,11 (±0,02)
Dier-specifiek	Dier + Drijfmest	1168 (±42)	1114 (±40)	5	0	0	100	0.99	0.99	1,00 (±0,02)
Koppel-specifiek	Drijfmest	706 (±15)	966 (±85)	75	34	65	1	0.69	0.16	0,11 (±0,02)
Koppel-specifiek	Dier + Drijfmest	1168 (±42)	1110 (±42)	6	0	0	100	0.98	0.98	1,00 (±0,02)
Koppel-standaard	Drijfmest	706 (±15)	966 (±85)	75	34	65	1	0.69	0.16	0,11 (±0,02)
Koppel-standaard	Dier + Drijfmest	1168 (±42)	1115 (±40)	5	0	0	99	0.99	0.99	0,99 (±0,02)

4 Algemene discussie - aanbevelingen en conclusies

Uit de resultaten blijkt dat, onder de specifieke omstandigheden waarin het experiment werd uitgevoerd, het ventilatiedebiet in natuurlijk geventileerde melkveestallen in de huidige onderzoeken wordt onderschat met 16% in geval van de meest gebruikte modelimplementatie, oplopend tot 24% voor de andere onderzochte implementaties. Dit betekent dat ook de uitstoot van ammoniak en methaan in deze studie proportioneel met 16 tot 24% wordt onderschat. In dit hoofdstuk komen de mogelijke oorzaken van de afwijking en de implicaties voor de toepassing als meetmethode voor stalventilatie aan bod. Daarbij wordt recente informatie gebruikt van een tijdens de uitvoering van dit onderzoek verschenen publicatie over CO₂-productiemodellen van lacterende koeien door Kjeldsen et al. (2024) gebaseerd op een grote database met CO₂-productiemetingen van melkkoeien in respiratiecellen. Afgesloten wordt met een samenvattende conclusie en aanbevelingen voor toepassing en verdere verbetering van deze meetmethode.

4.1 Sterktes en beperkingen van deze studie

Deze studie biedt een belangrijk inzicht in het gebruik van het CIGR-model voor het berekenen van de CO₂-productie van HF-melkvee in Nederland en het daaropvolgende effect op de bepaling van de het ventilatiedebiet dat wordt gebruikt voor de berekening van de emissies uit stallen.

Ten eerste is duidelijk geworden dat een grondige validatie van het CO₂-productiemodel van groot belang is om stalemissies goed te kunnen kwantificeren. Uit de afwijking van het huidige CIGR-model die is aangetoond en gekwantificeerd, wordt duidelijk dat modellen die zijn gebaseerd op de fysiologie van dieren moeten worden geüpdatet als gevolg van veranderende omstandigheden. Immers, het metabolisme van dieren blijft zich samen met fokprogramma's ontwikkelen. Idealiter worden dergelijke modellen getoetst worden in commerciële stallen ofwel de echte praktijk. Dit omdat de compartimenten waarin dit onderzoek is uitgevoerd niet op alle aspecten overeen zullen komen met de variëteit in werkelijke praktijkomstandigheden. Desalniettemin zijn de gebruikte compartimenten de best mogelijke optie voor deze validatiestudie geweest, doordat deze stallen in veel opzichten representatiever zijn voor de werkelijke praktijkomstandigheden dan respiratiecellen.

Deze studie toonde het directe effect aan van de afwijkingen in de voorspelling van de CO₂-productie (dieren en drijfmest) op het ventilatiedebiet. Dit is van groot belang omdat dit de basis vormt voor de berekening van stalemissies. Deze studie is daarin uniek, omdat de ventilatiedebietschatting middels het CIGR-model niet eerder op stalniveau is gevalideerd. Daarnaast is inzicht verkregen in het effect van verschillende variabelen zoals drijfmestvolume, variatie in dierenkenmerken en temperatuur op CO₂-productie. Verder is in deze studie de bijdrage in CO₂-productie van drijfmest ten opzichte van de totale CO₂-productie in de stal bepaald. Dit is van meerwaarde voor het verkleinen van de fout in ventilatiedebiet en daarmee emissieschatting. De voorspelling van de CO₂-productie uit drijfmest is echter nog niet nauwkeurig genoeg om het ventilatiedebiet te kunnen schatten in een stal zonder dieren. Dit vereist aanvullend onderzoek naar het effect van de fysisch-chemische eigenschappen van drijfmest op de CO₂-productie van drijfmest.

Het huidige onderzoek is afgebakend tot het specifieke systeem waarin het experiment is uitgevoerd (d.w.z. het noordwestelijke Europese klimaat, Holstein-Friesian-koeien met een hoge melkproductie en een gras-mais rantsoen). Het grootste deel van de Nederlandse melkveestapel valt binnen deze condities. Om het model voor lagere productieniveaus en andere rassen te kunnen valideren, is nader onderzoek vereist.

Een kanttekening bij dit onderzoek is dat ongeveer 20% van de meetwaarden niet in de analyse is meegenomen vanwege geopende deuren tussen de compartimenten tijdens het melken en voeren van de dieren. Dit leidt er niet alleen toe dat deze gegevens misten, maar ook dat niet alle feces en urine in de mestopslag terecht komen waardoor de CO₂-productie van de mestopslag enigszins kan worden onderschat.

Er wordt echter verwacht dat dit effect beperkt is doordat de melkingen tweemaal daags een half uur duurden (de deuren waren wel tweemaal daags 2 uur geopend).

Ondanks grondige kalibraties, meerdere herhalingen en recovery-testen die zijn uitgevoerd ten behoeve van de betrouwbaarheid van de resultaten, kennen de gepresenteerde resultaten in dit rapport een onzekerheid. Zo was de massabalans (recovery rate) in compartiment A en B met respectievelijk 105% en 98% niet volledig sluitend en zijn de gemeten waarden overeenkomstig hieraan gecorrigeerd. De beoordeling van prestatie van het CIGR-model is echter gevoelig voor onzekerheid in de meetopstelling. Om zekerheid te vergroten over de gevonden resultaten is herhaling van onderzoeken van belang. Daarom is het relevant dat Kjeldsen et al. (2024), op basis van gemeten CO₂-producties via GreenFeed en respiratiecellen, ook een onderschatting van de CO₂-productie met het CIGR-model heeft waargenomen (zie verder 4.2). Dit geeft meer vertrouwen in de gevonden resultaten uit deze studie.

4.2 Literatuurvergelijking en reproduceerbaarheid van de resultaten

Ondanks verschillen tussen de modelimplementaties, is de belangrijkste conclusie die uit deze studie kan worden getrokken dat de CO₂-productie van melkkoeien in lactatie met het huidige CIGR-model wordt onderschat. Dit komt overeen met de bevindingen van Kjeldsen et al. (2024), waarin drie CO₂-productiemodellen zijn geformuleerd op basis van metingen in respiratiecellen en metingen met GreenFeeds in stallen. De gemeten CO₂-productie is ook vergeleken met de CO₂-productie voorspeld door het CIGR-model. Hieruit bleek dat de CO₂-productie met ongeveer 15% wordt onderschat. Kjeldsen et al. (2024) toonden ook aan dat het CIGR-model niet goed in staat is om de verschillen op individueel dierniveau te dekken. De beperkte modelprestatie op dierniveau heeft een toepassing in de praktijk echter niet te belemmeren aangezien het CIGR-model veelal op koppelniveau wordt toegepast ten behoeve van emissiebepaling. Een aanbeveling voor vervolgonderzoek is wel om de modellen zoals gepresenteerd door Kjeldsen et al. (2024) te toetsen aan de metingen die in dit onderzoek zijn uitgevoerd. Een beperking van Kjeldsen et al. (2024) is echter dat er geen CO₂-productie uit drijfmest wordt voorspeld.

In een studie uitgevoerd door het Belgisch Instituut voor Landbouw-, Visserij- en Voedingsonderzoek (ILVO) in een standaard melkveestal met roostervloer zijn metingen van het ventilatiedebiet op basis van windrichting en windsnelheid vergeleken met die berekeningen volgens het VERA-protocol (VERA 2018), dat gebaseerd is op de het CIGR-model (CIGR, 2002, Pedersen, 2008). Uit deze studie blijkt dat het ventilatiedebiet op basis van het CIGR-model gemiddeld 9% (variatie tussen -34% en 33%) lager is dan gemeten met luchtsnelheidsensoren. Ook deze studie wijst op een onderschatting van het ventilatiedebiet bij gebruik van het CIGR-model, zij het dat de gemiddelde afwijking lager ligt dan in de huidige studie en de studie van Kjeldsen et al. (2024). De grote variaties die ILVO heeft vastgesteld, tonen echter aan dat ook hier verder onderzoek en validatie nodig is (ILVO, 2025 Mededeling D/2025/06).

De consistentie in de onderschatting van de CO₂-productie (en dus het ventilatiedebiet) die is gevonden in de verschillende experimentele stallen en meetperiodes (zie Figuur 3.1), geeft vertrouwen in de reproduceerbaarheid van de resultaten. We bevelen echter aan om het experiment te herhalen in andere mechanisch geventileerde stallen om de herhaalbaarheid van dit onderzoek en de bevindingen ervan te beoordelen.

4.3 Afwijking van het CO₂-productiemodel en mogelijke oorzaken

De evaluatie van de nauwkeurigheid van de CO₂-productievoorspellingen van het CIGR-model (zoals gedefinieerd in 2.2) die in deze studie is uitgevoerd, heeft aangetoond dat er een systematische afwijking is ten opzichte van de werkelijke (gemeten) CO₂-productieniveaus. Dit resultaat heeft aanzienlijke gevolgen voor de voorspelling van de ventilatiedebieten van stallen die worden gebruikt bij de berekening van stalemissies. Uit een vergelijking tussen modellen (paragraaf 4.2) is gebleken dat verschillende

modelimplementaties (dier-specifiek, koppel-specifiek, koppel-standaard) leiden tot verschillende niveaus van afwijking. De systematische aard van de afwijking maakt het echter mogelijk om correctiefactoren te gebruiken. Niettemin moet de oorzaak van de afwijking worden geïdentificeerd en beter worden begrepen om het CO₂-productiemodel (dieren + drijfmest) verder te verbeteren.

Onverwacht bleek de modelimplementatie met de minste invoergegevens (koppel-standaard) de beste schattingen van het ventilatiedebiet op te leveren. Het verschil tussen dit koppel-standaard model en de data-intensieve modellen (dier-specifiek en koppel-specifiek) is dat het diergewicht en de drachtijd gemiddeld respectievelijk 6% en 67% lager zijn in de data-intensieve modellen. Als gevolg hiervan wordt de CO₂-productie in het koppel-standaard model hoger geschat, waardoor ook het ventilatiedebiet hoger is geschat. Niettemin leidt het koppel-standaard model ook na het toepassen van correctiefactoren tot het beste resultaat. Dit betekent dat de modelcoëfficiënten voor het gewicht van de dieren (5,6) en de draagtijd (0,000016) in het CIGR-model onvoldoende zijn om de gemeten CO₂-productie te verklaren. Dit zou het gevolg kunnen zijn van het feit dat dit model is opgesteld voor dieren waarvan de metabolisme-eigenschappen met betrekking tot warmte- en CO₂-productie verschilden van die van de dieren gebruikt in deze studie.

De productie-eigenschappen van Holstein-Friesian melkkoeien zijn de afgelopen 25 jaar aanzienlijk veranderd. Dit is ongeveer de periode tussen het oorspronkelijke CIGR-model voor warmteproductie (2002, gebaseerd op dieren uit de jaren 90) en de koeien waarmee het huidige onderzoek is uitgevoerd. In 2022 heeft CVB geschat dat binnen dit tijdsbestek het lichaamsgewicht van Nederlandse en Belgische HF-koeien is toegenomen van 601 tot 675 kg, met een referentiegemiddelde van 650 kg (CVB 2022). Tegelijkertijd is de melkproductie tussen 1990 en 2024 gestegen van ongeveer 6000 tot 9300 kg·jaar⁻¹·dier⁻¹ (Bikker et al., 2019; CRV, 2024). Toegenomen lichaamsgewicht en melkproductie leiden tot hogere voeropnames. Het is aannemelijk dat de omrekeningsfactor die in Pedersen et al. (2008) is vastgesteld om de totale warmteproductie van een melkkoe om te rekenen naar een CO₂-productiesnelheid (180 L CO₂·kW⁻¹·uur⁻¹ geproduceerde warmte) niet langer accuraat is voor huidige HF melkkoeien. Pedersen et al. (2008) beschreven de positieve relatie tussen de respiratoire quotiënt (RQ) en de CO₂-productie per kW geproduceerde warmte. De RQ (en dus ook de CO₂-productie) is afhankelijk van de verhouding vetten en koolhydraten in het rantsoen. De totale CO₂-productie neemt echter toe met de voeropname en met het lichaamsgewicht. Zoals hierboven beschreven, is het diergewicht toegenomen evenals de voeropname. Daarom is het mogelijk dat de omrekeningsfactor van L CO₂·kW⁻¹·uur⁻¹ warmte te laag is geworden voor moderne Nederlandse HF-koeien, waardoor de CO₂-productie onderschat wordt.

Verder is bekend dat de warmteproductie (en dus de CO₂-productie) verband houdt met dieractiviteit. Het CIGR-model is gebaseerd op metingen in respiratiecellen waarbij dieractiviteit beperkt is. Desalniettemin is ook via respiratiecelmetingen aangetoond dat bepaalde activiteiten (bijvoorbeeld eten, staan) leiden tot een hogere warmteproductie dan andere (bijvoorbeeld liggen) (Purwanto 1990, Talmón 2023). In dezelfde lijn kan worden aangenomen dat fysieke activiteiten zoals lopen een grotere warmteproductie veroorzaken (Brosh 2010, Aharoni 2013). In de afgelopen decennia hebben huisvestingssystemen voor de Nederlandse melkveehouderij zich ontwikkeld naar een systeem waarin dieren zich vrijer kunnen bewegen. Zo zijn er voorschriften voor de minimale vloeroppervlakte per dier en inmiddels een verbod op aanbindstallen op komst. Dit zijn slechts enkele van de stimulansen die hebben bijgedragen aan een verandering in de manier waarop melkkoeien in Nederland worden gehouden. Deze ontwikkeling in huisvestingsomstandigheden heeft geleid tot een toename van de dieractiviteit, wat ook een verklaring kan zijn voor een hogere CO₂-productie in vergelijking tot het CIGR-model uit 2002.

4.4 Mogelijkheden voor nader onderzoek

De resultaten uit de huidige studie leiden tot vervolgvragen die invloed hebben op de CO₂-productievoorspelling die wordt toegepast in huidige meettrajecten om de emissies uit melkveestallen te monitoren.

Zoals toegelicht in 4.3, zijn de onnauwkeurigheden van het CIGR-model bij het voorspellen van de CO₂-productie van de dieren die in deze studie zijn opgenomen, waarschijnlijk te wijten aan de aanzienlijke veranderingen in het metabolismeniveau (hogere melkproductie) van dieren sinds de ontwikkeling van het oorspronkelijke model. Hoewel fysiologische relaties nog steeds geldig zijn, moeten de modelcoëfficiënten worden bijgewerkt. Dit vereist een grootschalige analyse van recente meetgegevens die representatief zijn voor de huidige West-Europese melkveestapel en ruime bandbreedte in de verklarende variabelen. Uiteindelijk zou dit het mogelijk maken om een bijgewerkte versie van het CIGR-model te gebruiken voor het schatten en monitoren van de emissies van melkgevend Holstein-Friesian koeien in Nederland. Tot die tijd kunnen de correcties zoals opgesteld in paragraaf 3.5 worden toegepast op het te berekenen ventilatiedebiet in melkveestallen.

Een alternatief voor deze aanpak is om de modellen te gebruiken die zijn ontwikkeld door Kjeldsen et al. (2024). Dit is een goed alternatief voor het CIGR-model, maar vereist ook een validatiestudie in de praktijk. Daarnaast is er een aanvullend model nodig om de CO₂-productie uit drijfmest te schatten. Daarvoor kan gebruik gemaakt worden van het in deze studie gepresenteerde model of een beter alternatief. Een eerste validatie van de Kjeldsen-modellen kan plaatsvinden door de modelvoorspellingen te toetsen aan de resultaten die in onze studie zijn verkregen. Hoewel deze studie een relatief kleine steekproef vertegenwoordigt, zou het een leerzame eerste stap zijn. In het geval dat de Kjeldsen-modellen nauwkeurig genoeg zijn, stellen we voor om het vereenvoudigde model (model 3 "on-farm model") te gebruiken, aangezien dit het meest toepasbare model is en alleen inputinformatie vereist die in praktijksituaties beschikbaar is.

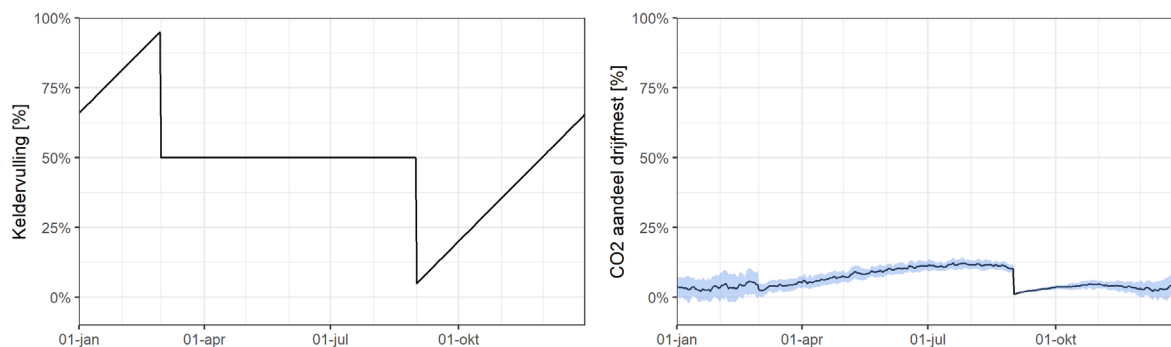
Een onderschatting van de CO₂-productie voor lacterende melkkoeien, roept de vraag op in hoeverre de schatting van het CIGR-model voor droogstaande koeien en jongvee klopt. Om dit te onderzoeken is aanvullend onderzoek vereist. Echter, de meeste CO₂ wordt in praktijkstallen geproduceerd door de lacterende melkkoeien waardoor een fout in CO₂-productie uit droogstaande dieren of jongvee een kleiner effect heeft. Doordat het berekende ventilatiedebiet in ventilatiecomponenten kan worden opgedeeld is onze aanbeveling om het totale debiet te berekenen via de som van de ventilatiecomponenten. Zie hiervoor Formule 22:

$$VR_{\text{totaal}} = \text{aantal melkkoeien} \times (b + a \times VR_{\text{melkkoe}}) + VR_{\text{drijfmest}} + VR_{\text{drogekoeien}} + VR_{\text{jongvee}} \quad \textbf{Formule 22}$$

Met VR_{melkkoe} in $\text{m}^3 \cdot \text{uur}^{-1} \cdot \text{dier}^{-1}$, VR_{totaal} , $VR_{\text{drijfmest}}$, $VR_{\text{drogekoeien}}$ en VR_{jongvee} in $\text{m}^3 \cdot \text{uur}^{-1}$

Waarbij coëfficiënten b en a verkregen zijn in deze studies via Formules 18-20, $VR_{\text{drijfmest}}$ is gebaseerd op Formule 17 en de berekeningsmethodiek voor $VR_{\text{drogekoeien}}$ en VR_{jongvee} volgt uit CIGR (2002) en Pedersen et.al. (2008).

Ook volgt uit het huidige onderzoek de vraag of het vernieuwde model voor de CO₂-productie uit drijfmest toegepast kan worden in de praktijk aangezien het drijfmestvolume varieert tussen bedrijven en op dit moment niet frequent gemeten wordt. In de toepassing van het voorgestelde verbeterde model kan enerzijds gekozen worden om het mestvolume te meten via mesthoogtesensoren. Anderzijds kan er ook gekozen worden voor een modelmatige benadering van het drijfmestvolume zoals gevisualiseerd in Figuur 4.1. Hiervoor is aangenomen dat het drijfmestvolume lineair stijgt van 5% naar 95% van de totale mestopslagcapaciteit gedurende het mestopslagseizoen. Tijdens de mestuitrijdperiode van 1 maart tot 31 augustus is het drijfmestvolume ingeschat op 50% van de mestopslagcapaciteit. Met een dergelijk patroon varieert de CO₂-productie uit drijfmest tussen de 0% en 12,5% van de totale CO₂-productie in een stal, gebaseerd op een mestopslagcapaciteit van $11 \text{ m}^3 \cdot \text{dier}^{-1}$. Er zal echter in de praktijk veel variatie zijn in mestopslagcapaciteit, mate van keldervulling (bijvoorbeeld als gevolg van weidegang) en de samenstelling van de drijfmest (bijvoorbeeld wanneer er veel water wordt toegevoegd aan de drijfmest). Omdat de CO₂-productie uit drijfmest gemiddeld 10%-20% van de totale CO₂-productie bedraagt, is de verwachting dat een bedrijfsspecifieke inschatting van het drijfmestvolume kan volstaan.



Figuur 4.1 Links: een modelmatige benadering van het drijfmestvolume in de mestkelder van een melkveestal. Rechts: een inschatting van de procentuele bijdrage van drijfmest aan de totale CO₂-productie in een melkveestal gebaseerd op een mestopslagcapaciteit van 11 m³·dier⁻¹ en de keldervulling uit de linker figuur.

Zoals eerder benoemd vereist het model voor de CO₂-productie uit drijfmest nader onderzoek, omdat de betrouwbaarheid nog te laag is. Ook zal dan onderzocht moeten worden of met een verbeterd drijfmest-model het ventilatiedebiet van een stal voorspeld kan worden bij afwezigheid van de dieren. De resultaten uit Tabel 3.4 tonen aan dat de CO₂-productie uit drijfmest niet nauwkeurig genoeg voorspeld kan worden om hierop het ventilatiedebiet te baseren bij afwezigheid van dieren. Om dit te bereiken is het nodig om ten minste het drijfmestvolume goed in te kunnen schatten en om een nauwkeuriger model voor de CO₂-productie uit drijfmest te definiëren met daarin verklarende variabelen zoals drijfmesttemperatuur en mestsamenvatting (VanderZaag et al., 2010).

4.5 Implicaties voor beleid, onderzoek en praktijk

Het doorvoeren van de, in dit rapport voorgestelde correcties op het CIGR-model, zal leiden tot een aanzienlijk hoger ventilatiedebiet en daarmee tot hogere gemeten NH₃- en CH₄-emissies uit natuurlijk geventileerde melkveestallen. Omdat in de huidige metingen meestal het praktijktoepassingsmodel wordt gebruikt, zal de NH₃-emissie met gemiddeld 16% toenemen. In Van Bruggen en Geertjes (2019) is eerder gerapporteerd dat de verwachte stikstofverliezen hoger zijn dan wat op basis van stikstofemissiefactoren (NH₃, N₂O, NO_x, N₂) de verwachting was. Dit werd later ook bevestigd door Groenestein et al (2023). In de laatstgenoemde studie werd geconcludeerd dat het stikstofverlies tussen emissie-arme stallen en conventionele stallen niet significant van elkaar verschilde. De bevindingen uit het huidige onderzoek hebben geen effect op deze laatste conclusie, omdat de CO₂-productie in zowel conventionele stallen als emissie-arme stallen vergelijkbaar is.

De bevindingen uit deze studie kunnen ook betrekking hebben op de huidige emissiefactoren van melkvee. Een groot deel van de vastgestelde emissiefactoren voor emissiereducerende systemen bij melkkoeien is gebaseerd op het originele CIGR-model en hebben kans onderschat te zijn. Voor emissiefactoren die zijn vastgesteld in mechanisch geventileerde stallen of via een control-case studie heeft een afwijking van het CIGR-model geen effect. Belangrijk is dat er meer fundamenteel onderzoek wordt gedaan naar de oorzaak van de afwijking die in deze studie gevonden is. De afwijking van het CIGR-model kan immers systematisch zijn als gevolg van een verschil tussen praktijkmetingen en metingen in respiratiecellen, maar kan zich ook geleidelijk hebben ontwikkeld als gevolg van (genetische) veranderingen in melkkoeien.

4.6 Conclusie

Deze studie heeft aangetoond dat de CO₂-productie van lacterende HF-melkkoeien 16% hoger is dan voorspeld met het CIGR-model op basis van een lichaamsgewicht van 650 kg, een drachtijd van 160 dagen en een koppelgemiddelde melkproductie. Een herziening van modelcoëfficiënten is daarom nodig ten behoeve van nauwkeurige emissieschattingen uit melkveestallen. De validatie van het CIGR-model in deze

studie beperkt zich tot het ras en de productieniveau van het onderzoek. Resultaten en conclusies zijn daardoor niet zonder meer door te vertalen naar andere rassen en afwijkende productieniveaus.

Literatuur

- Aharoni, Y., Dolev, A., Henkin, Z., Yehuda, Y., Ezra, A., Ungar, E. D., Shabtay, A., & Brosh, A. (2013). Foraging behavior of two cattle breeds, a whole-year study: I. Heat production, activity, and energy costs¹. *Journal of Animal Science*, 91(3), 1381–1390. <https://doi.org/10.2527/jas.2012-5400>
- Bikker, P., Šebek, L.B., C. van Bruggen & Oenema, O. (2019). Stikstof- en fosfaatexcretie van gangbaar en biologisch gehouden landbouwhuisdieren. Herziening excretieforfaits Meststoffenwet 2019. Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu, WUR, Wageningen. WOt-technical report 152. 87 blz.; 11 tab.; 34 ref; 11 Bijlagen
- Brosh, A., Henkin, Z., Ungar, E. D., Dolev, A., Shabtay, A., Orlov, A., Yehuda, Y., & Aharoni, Y. (2010). Energy cost of activities and locomotion of grazing cows: A repeated study in larger plots¹. *Journal of Animal Science*, 88(1), 315–323. <https://doi.org/10.2527/jas.2009-2108>
- Bruggen, C. van, & Geertjes, K. (2019). Stikstofverlies uit opgeslagen mest - Stikstofverlies berekend uit het verschil in verhouding tussen stikstof en fosfaat bij excretie en bij mestafvoer. Centraal Bureau voor de Statistiek.
- CIGR. (2002). 4th Report of Working Group on Climatization of Animal Houses Heat and moisture production at animal and house levels (No. ISBN 87-88976-60-2; p. 45). Research Centre Bygholm, Danish Institute of Agricultural Sciences.
- CBS. (2024, 2 Oktober). Emissies van broeikasgassen berekend volgens IPCC-voorschriften. <https://www.cbs.nl/nl-nl/cijfers/detail/85669NED>
- CRV. (2024, 16 Oktober). Productie Nederlandse melkkoeien stabiliseerde in boekjaar 2023-2024. <https://crv4all.nl/nl/news/levensproductie-van-vlaamse-melkkoeien-stijgt-naar-recordhoogte>
- CVB, Stichting (2022). Body weight of Holstein Friesian cows. CVB Documentation report nr. 78 (p. 18).
- Groenestein, C. M., Bikker, P., Hoeksma, P., Zom, R. L. G., & Bruggen, C. van. (2014). Excretieforfaits van mest: verschillen tussen berekende en gemeten N/P2O5 ratio's in mest. Rapport / Wageningen UR Livestock Research; rapport. 748. Wageningen UR Livestock Research. <https://edepot.wur.nl/330481>
- Groenestein, C. M., P. W. Goedhart, C. van Bruggen, I. de Jonge de en N.W.M. Ogink, 2023. Schatting van stikstofverliezen uit stallen op basis van stikstof-fosfaat verhouding in afgevoerde mest - Evaluatie van de NP-methode en effect van staltype. Wageningen Livestock Research, Rapport 1426. <https://edepot.wur.nl/631641>
- ILVO. (2025). MEDEDELING D/2025/06 Meetcampagne voor de bepaling van de ammoniakemissies van een traditionele melkveestal (p. 79).
- Kjeldsen, M. H., Johansen, M., Weisbjerg, M. R., Hellwing, A. L. F., Bannink, A., Colombini, S., Crompton, L., Dijkstra, J., Eugène, M., Guinguina, A., Hristov, A. N., Huhtanen, P., Jonker, A., Kreuzer, M., Kuhla, B., Martin, C., Moate, P. J., Niu, P., Peiren, N., ... Lund, P. (2024). Predicting CO₂ production of lactating dairy cows from animal, dietary, and production traits using an international dataset. *Journal of Dairy Science*, 107(9), 6771–6784. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-24414>
- Marra, W., Hazelhorst, S., Jongh, L. de, Kruit, R. W., Schram, J., & Brandt, K. (2024). Monitor stikstofdepositie in Natura 2000-gebieden 2024.

-
- Misselbrook, T., Hunt, J., Perazzolo, F., & Provolo, G. (2016). Greenhouse Gas and Ammonia Emissions from Slurry Storage: Impacts of Temperature and Potential Mitigation through Covering (Pig Slurry) or Acidification (Cattle Slurry). *Journal of Environmental Quality*, 45(5), 1520–1530. <https://doi.org/10.2134/jeq2015.12.0618>
- Mosquera Losada, J., Groenestein, K., Ogink, N., & Aarnink, A. (2012). Evaluation of the CO₂ mass balance method to calculate ventilation rates from mechanically ventilated livestock buildings. 2012 IX International Livestock Environment Symposium (ILES IX). <https://doi.org/10.13031/2013.41630>
- 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*, Manuscript BC 08 008, Vol. X. December, 2008, 19.
- Purwanto, B. P., Abo, Y., Sakamoto, R., Furumoto, F., & Yamamoto, S. (1990). Diurnal patterns of heat production and heart rate under thermoneutral conditions in Holstein Friesian cows differing in milk production. *The Journal of Agricultural Science*, 114(2), 139–142. <https://doi.org/10.1017/s0021859600072117>
- Talmón, D., Zhou, M., Carriquiry, M., Aarnink, A. J. A., & Gerrits, W. J. J. (2023). Effect of animal activity and air temperature on heat production, heart rate, and oxygen pulse in lactating Holstein cows. *Journal of Dairy Science*, 106(2), 1475–1487. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-22257>
- VanderZaag, A. C., Gordon, R. J., Jamieson, R. C., Burton, D. L., & Stratton, G. W. (2010). Effects of winter storage conditions and subsequent agitation on gaseous emissions from liquid dairy manure. *Canadian Journal of Soil Science*, 90(1), 229–239. <https://doi.org/10.4141/cjss09040>
- Winkel, A., Bokma, S., Hol, J. M. G., & Blanken, K. (2019). Ammonia emission of the MeadowFloor CL for dairy barns : A case-control study in the Environmental Research Barn of Dairy Campus (p. Wageningen Livestock Research, Report 1275).

Bijlage 1

Tabel B1 Gemeten CO₂ concentraties van ingaande en uitgaande stallucht en het gemeten en voorspelde ventilatiedebiet uitgesplitst naar meetperiode, behandeling, en compartiment. Het voorspelde ventilatiedebiet is weergegeven per implementatiemethode van het CIGR-model (dier-specifiek, koppel-specifiek en koppel-standaard).

CO ₂ bron	Meet-periode	Drijfmest-niveau	Compart.	CO ₂ -concentratie buitenlucht	CO ₂ -concentratie stallucht	Ventilatiedebiet gemeten	Ventilatiedebiet voorspeld		
				[ppm]	[ppm]	[m ³ ·uur ⁻¹ ·dier ⁻¹]	Dier-specifiek [m ³ ·uur ⁻¹ ·dier ⁻¹]	Koppel-specifiek [m ³ ·uur ⁻¹ ·dier ⁻¹]	Koppel-standaard [m ³ ·uur ⁻¹ ·dier ⁻¹]
Dier + Drijfmest	1	Hoog	A	456	866	934	743	743	807
			B	456	841	1018	811	812	863
		Laag	A	457	913	876	667	667	721
			B	457	891	956	727	729	767
	2	Hoog	A	466	845	1115	843	855	910
			B	466	820	1234	904	915	987
		Laag	A	463	786	1145	867	883	944
			B	463	760	1212	898	913	988
	3	Hoog	A	462	800	1130	983	984	1036
			B	462	784	1249	1076	1078	1119
		Laag	A	448	746	1212	1074	1078	1126
			B	448	737	1329	1174	1177	1215
Drijfmest	1	Hoog	A	462	521	578	476	476	517
			B	462	505	645	678	679	723
		Laag	A	448	484	556	803	804	867
			B	448	474	611	1139	1141	1203
	2	Hoog	A	459	506	691	590	599	634
			B	459	496	773	708	718	772
		Laag	A	481	531	662	537	545	577
			B	481	512	721	827	840	901
	3	Hoog	A	448	467	683	1546	1549	1621
			B	448	466	750	1771	1775	1837
		Laag	A	449	461	641	2544	2549	2670
			B	449	460	711	2812	2820	2918

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



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

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

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

