



Monitoring van methaan-, ammoniak-, en lachgasemissies uit twee natuurlijk geventileerde geitenstallen

Praktijkmetingen in de periode oktober 2018-oktober 2020

J. Mosquera, H.J.C. van Dooren, J.M.G. Hol, J.P.M. Ploegaert, N.W.M. Ogink

Rapport 1378



WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH

Monitoring van methaan-, ammoniak-, en lachgasemissies uit twee natuurlijk geventileerde geitenstallen

Praktijkmetingen in de periode oktober 2018-oktober 2020

J. Mosquera, H.J.C. van Dooren, J.M.G. Hol, J.P.M. Ploegaert, N.W.M. Ogink

Wageningen Livestock Research

Dit onderzoek is uitgevoerd door Wageningen Livestock Research en gesubsidieerd door het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, in het kader van het Beleidsondersteunend onderzoek thema 'Klimaat Slim Methaan emissie veehouderij' (BO-53-003-003).

Wageningen Livestock Research
Wageningen, oktober 2022

Rapport 1378

Mosquera, J., H.J.C. van Dooren, J.M.G. Hol, J.P.M. Ploegaert, N.W.M. Ogink, 2021; *Monitoring van methaan-, ammoniak-, en lachgasemissies uit twee natuurlijk geventileerde geitenstallen; Praktijkmetingen in de periode oktober 2018-oktober 2020, 2022*. Wageningen Livestock Research, Openbaar Rapport 1378.

Samenvatting NL Dit rapport beschrijft de resultaten van metingen van de emissies van methaan, ammoniak en lachgas die op 2 bedrijven voor geiten zijn uitgevoerd in de periode van oktober 2018 t/m oktober 2020. De metingen zijn continue uitgevoerd (met behulp van een bedrijfsmonitoring systeem met sensoren voor ammoniak, methaan en kooldioxide). Daarnaast zijn elke twee maanden referentiemetingen (volgens de huidige meetprotocollen) uitgevoerd. Doel van de metingen was de emissies van methaan, ammoniak en lachgas uit traditionele huisvestingssystemen voor geiten vast te stellen. Op basis van referentiemetingen is de gemiddelde emissie \pm standaarddeviatie tussen bedrijven ($n=2$) $27,7 \pm 0,4$ kg CH₄ per jaar per dierplaats, $3,6 \pm 0,1$ kg NH₃ per jaar per dierplaats en 61 ± 10 g N₂O per jaar per dierplaats. Voor geiten wordt geen leegstand verrekend. Er zijn geen significante verschillen gevonden tussen de emissies die bepaald zijn door middel van continue metingen, en op basis van de referentiemetingen. De pot levert een grote bijdrage aan de totale CO₂-productie in de stal is. De CO₂-productie uit de pot is, gemiddeld over de twee gemeten stallen, 50% van de CO₂-productie uit de dieren.

Summary UK This report summarizes the results of emission measurements that were carried out on two goat farms in the period October 2018 – October 2020. The measurements were performed continuously using a measurement system equipped with sensors for ammonia, methane and carbon dioxide. Besides, reference measurements (according to current measurement protocols) were performed every 2 months. Goal of the measurements was to determine the average methane emission (CH₄) from goats. Beside methane emissions also emissions of ammonia (NH₃) and nitrous oxide (N₂O) have been measured. Based on reference measurements, the average emission \pm standard deviation between farms ($n=2$) was estimated to be 27.7 ± 0.4 kg CH₄ per year per animal place, 3.6 ± 0.1 kg NH₃ per year per animal place and 61 ± 10 g N₂O per year per animal place. For goats, no correction for unoccupancy of the livestock building is applied. No significant differences were found between the emissions determined by means of continuous measurements and based on the reference measurements. The deep-litter has a major contribution to the total CO₂ production inside the livestock building. The CO₂ production from the deep-litter was, averaged over the two measured farms, 50% of the CO₂ production from the animals.

Dit rapport is gratis te downloaden op <https://doi.org/10.18174/572111> 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, 2021
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.

Openbaar Wageningen Livestock Research Rapport 1378

Inhoud

| | | |
|------------------|---------------------------------------|-----------|
| | Samenvatting | 5 |
| 1 | Inleiding | 7 |
| 2 | Materiaal en methode | 9 |
| | 2.1 Stal en bedrijfssituatie | 9 |
| | 2.2 Metingen | 11 |
| | 2.2.1 Meetstrategie | 11 |
| | 2.2.2 Meetapparatuur | 12 |
| | 2.2.3 Management en diergegevens | 14 |
| | 2.3 Verwerking gegevens | 15 |
| | 2.3.1 Emissieberekening | 15 |
| | 2.3.2 Statistische analyse | 16 |
| 3 | Resultaten en discussie | 17 |
| 4 | Conclusies | 24 |
| | Literatuur | 25 |
| Bijlage 1 | Resultaten per locatie | 26 |
| | Bedrijf 1 (G1) | 26 |
| | <i>Huisvesting en bedrijfsvoering</i> | 26 |
| | <i>Resultaten</i> | 28 |
| | Bedrijf 2 (G2) | 35 |
| | <i>Huisvesting en bedrijfsvoering</i> | 35 |
| | <i>Resultaten</i> | 37 |
| Bijlage 2 | Meetapparatuur | 44 |

Samenvatting

De methaanemissie uit de veehouderij draagt in belangrijke mate bij aan de Nederlandse broeikasgasemissie. In de klimaatakkoord uit 2019 is daarom een reductiedoelstelling voor 2030 opgenomen. Voor de veehouderij betekent dit een reductie van 1,2-2,7 Mton CO₂-equivalenten waarvan tenminste 1 Mton CO₂-equivalenten door minder methaanuitstoot. Representatieve metingen van methaanemissie op stalniveau hebben tot dusver nauwelijks plaatsgevonden. Toetsing van de berekende methaanemissie uit de veehouderij is daarom niet mogelijk. In het kader van de klimaatvelop 2018 (KE2018) zijn daarom eind 2018 twee projecten opgestart met als belangrijkste doelen:

- de methaanemissie uit melkvee- en geitenstallen (KE2018-1) en uit varkens- en vleeskalverenstallen (KE2018-2) vast te stellen.
- de variatie in methaanemissie binnen en tussen bedrijven vast te stellen
- de mate van samenhang tussen gemeten methaanemissie en aanwezige bedrijfsfactoren vast te stellen
- demonstratie van directe bedrijfsmonitoring van emissies van methaan en ammoniak en demonstratie van de wijze waarop dit kan bijdragen aan het terugdringen van de methaanemissie via bedrijfsspecifieke maatregelen

Om deze doelen te kunnen realiseren is er gekozen voor een jaarrond meetaanpak gebaseerd op continue monitoring van de emissie van methaan (CH₄) en ammoniak (NH₃) op stalniveau die wordt vergeleken met referentiemetingen. Dit rapport beschrijft de resultaten van de metingen die in de periode oktober 2018 – oktober 2020 zijn uitgevoerd op 2 geitenlocaties. Daarin zijn de emissies van NH₃, CH₄ en N₂O, gemeten volgens de richtlijnen van de huidige meetprotocollen (Ogink et al., 2017; VERA, 2018). Door het beperkt aantal bedrijven die gemeten is, was niet mogelijk om inzicht te krijgen in de spreiding tussen bedrijven en samenhang met bedrijfsfactoren, wat oorspronkelijk ook doelen van het onderzoek waren.

De gemiddelde waarden van het ventilatiedebiet en de emissies van CH₄, NH₃ en N₂O (+/- standaarddeviatie tussen bedrijven; geen leegstand verrekend) is, voor de continue en de referentiemetingen:

| Kenmerk | Continue metingen | Referentiemetingen |
|---|-------------------|--------------------|
| Aantal bedrijven | 2 | 2 |
| Ventilatiedebiet (m ³ /uur/dier) | 146 ± 8 | 180 ± 15 |
| CH ₄ -emissie (kg/jaar per dierplaats) | 26,0 ± 1,8 | 27,7 ± 0,4 |
| NH ₃ -emissie (kg/jaar per dierplaats) | 3,7 ± 0,1 | 3,6 ± 0,1 |
| N ₂ O-emissie (g/jaar per dierplaats) | --- | 61 ± 10 |

Er zijn geen significante verschillen gevonden tussen de emissies die bepaald zijn door middel van continue metingen, en op basis van de referentiemetingen.

De pot levert een grote bijdrage aan de totale CO₂-productie in de stal. De CO₂-productie uit de pot is, gemiddeld over de twee gemeten stallen, 50% van de CO₂-productie van de dieren.



1 Inleiding

Het aandeel van de landbouw in de nationale broeikasgasemissie bedroeg in 2020 volgend de IPCC richtlijnen 16% (Emissieregistratie, 2022). De methaanemissie droeg daar in belangrijke mate, namelijk voor ruim de helft (54%), aan bij. De totale methaanemissie in Nederland was in 2020 733,4 kton waarvan 475,6 kton (65%) afkomstig was uit de veehouderij (bron: www.emissieregistratie.nl). Om de opwarming van de aarde zoveel mogelijk te beperken is in het klimaatakkoord uit 2019 een reductie van de nationale broeikasgasuitstoot in 2030 met 49% ten opzichte van 1990 vastgelegd. Om dit kunnen behalen is er door de deelnemende partijen in het klimaatakkoord een reductieopgave voor verschillende sectoren, waaronder landbouw en landgebruik, vastgelegd. Dit is voor landbouw en landgebruik 3,5 Mton CO₂-equivalenten (CO₂-eq.) bovenop bestaande beleid en bedraagt voor de veehouderij 1,2-2,7 Mton CO₂-eq. waarvan tenminste 1 Mton CO₂-eq. aan reductie van de methaanemissie. Dat komt overeen met een afname van 40 kton methaan oftewel een reductie van 8% ten opzichte de uitstoot van de veehouderij in 2020.

De methaanemissie voor geiten wordt momenteel in de National Inventory Reports (NIR) volgens richtlijnen van het IPCC bepaald door middel van standaard (Tier 1) emissiefactoren voor zowel enterische methaanemissie als voor methaanemissie uit mest, (Ruyssenaars et al., 2021). De resultaten en de achterliggende methodiek zijn beschreven in Van Bruggen et al. (2020) en Lagerwerf et al. (2019). In de praktijk zal er sprake zijn van variatie in methaanemissies uit stallen en mestopslagen als gevolg van een groot aantal bedrijfsfactoren die verbonden zijn aan uitvoer van stal en mestopslag, voer- en mestmanagement en omgevingsfactoren (Groenestein et al., 2016). De omvang van deze variatie is niet bekend. Inzicht in deze variatie en de samenhang met aanwezige bedrijfsfactoren is belangrijk om technische maatregelen voor reductie van de methaanemissie uit stallen en mestopslagen effectief in te zetten. Met deze kennis kan maatwerk per bedrijf en regio worden ontwikkeld. Representatieve metingen van ammoniak- en methaanemissie op stalniveau hebben tot dusver beperkt plaatsgevonden (Huis in 't Veld et al., 2002; Beurskens et al., 2004; Aarnink al., 2014). Toetsing van de berekende ammoniak- en methaanemissie uit de veehouderij is daarom niet mogelijk.

Wanneer methaan- en ammoniakemissie uit stallen tevens direct inzichtelijk zou zijn voor veehouders kan dat een belangrijke stimulans zijn om de bedrijfsvoering te optimaliseren en/of methaan-reducerende maatregelen in te voeren. Dergelijke bedrijfsmonitoring kan op termijn ook de mogelijkheid bieden om afspraken te maken over de uitstoot van methaan- en ammoniakemissies en deze te borgen.

In het kader van de klimaatenvelop 2018 (KE2018) zijn daarom eind 2018 twee projecten opgestart met als belangrijkste doelen:

1. de methaanemissie uit melkvee- en geitenstallen (KE2018-1) en uit varkens- en vleeskalverenstallen (KE2018-2) vast te stellen
2. de variatie in methaanemissie binnen en tussen bedrijven vast te stellen
3. de mate van samenhang tussen gemeten methaanemissie en aanwezige bedrijfsfactoren vast te stellen
4. demonstratie van directe bedrijfsmonitoring van emissies van methaan en ammoniak en demonstratie van de wijze waarop dit kan bijdragen aan het terugdringen van de methaanemissie via bedrijfsspecifieke maatregelen

Om deze doelen te kunnen realiseren is gekozen voor een jaarrond meetaanpak gebaseerd op continue monitoring van de emissie van methaan (CH₄) en ammoniak (NH₃) op stalniveau die wordt vergeleken met protocollaire referentiemetingen. Een jaarrond aanpak is noodzakelijk omdat sommige invloedfactoren zoals voeding of klimaat seizoensgebonden zijn. Deze continue metingen zijn met een frequentie van minimaal één keer per twee maanden gecontroleerd door middel van erkende

referentiemetingen (metingen uitgevoerd volgens de huidige meetprotocollen). Afwijkingen in de sensoren zijn op basis van deze referentiemetingen bijgestuurd (veldkalibratie).

Door het beperkt aantal bedrijven die in dit onderzoek gemeten zijn ($n=2$), is het niet mogelijk om verschillen binnen en tussen bedrijven statistisch te toetsen. Aanvullend zijn in 2022 in het kader van het Nationaal Kennisprogramma Stikstof (NKS) metingen aan twee mechanisch geventileerde geitenstallen opgestart om de emissies van NH_3 , CH_4 , N_2O , geur en fijnstof vast te stellen. De verwachting is dat deze metingen aan het einde van 2023 gerapporteerd zullen worden. Gekeken zal worden of, op basis van de metingen van de Klimaatvelop en de NKS samen, een emissiefactor kan worden vastgesteld.

In dit rapport worden de resultaten beschreven van zowel de referentiemetingen als de continue metingen die in 2 natuurlijk geventileerde geitenstallen zijn uitgevoerd als onderdeel van de Klimaatvelop. In hoofdstuk 2 wordt een korte beschrijving gegeven van de gekozen meetlocaties, meetstrategie en berekeningsmethodiek (inclusief statistische analyse). In Hoofdstuk 3 worden de belangrijkste resultaten uit dit onderzoek weergegeven en besproken en in hoofdstuk 4 worden op basis daarvan enkele conclusies getrokken.

2 Materiaal en methode

2.1 Stal en bedrijfssituatie

In dit rapport worden de resultaten gepresenteerd van de metingen die in twee natuurlijk geventileerde geitenstallen door Wageningen Livestock Research (WLR) zijn uitgevoerd. Deze metingen maakten onderdeel uit van een groter project waarin naast deze geitenstallen in dezelfde periode ook metingen zijn uitgevoerd op 18 melkveebedrijven, 2 vleeskalverbedrijven, 2 biggenstallen, 2 vleesvarkensstallen en 1 stal voor dragende zeugen. De resultaten van de metingen op melkvee-, vleeskalveren- en varkensbedrijven worden elders gerapporteerd. In Tabel 1 zijn de belangrijkste kenmerken van de gemeten stallocaties weergegeven. In Bijlage 1 worden de locaties verder toegelicht, inclusief de belangrijkste resultaten per locatie.

In de periode van oktober 2018 t/m oktober 2020 zijn de emissies van ammoniak (NH_3) en methaan (CH_4) continue gemeten. Naast de continue metingen zijn elke twee maanden referentiemetingen uitgevoerd om de emissies van ammoniak (NH_3), methaan (CH_4) en lachgas (N_2O) volgens de richtlijnen van de huidige meetprotocollen (Ogink et al., 2017; VERA, 2018) vast te stellen.

De metingen vonden plaats in twee verschillende geitenstallen op twee verschillende bedrijven. Beide gemeten stallen werden natuurlijk geventileerd. De grootte van de luchtinlaat werd met behulp van handmatig bediende ventilatiegordijnen aan de zijkanten van de stal gereguleerd. Een open nok midden in de stal over de gehele lente was de luchtuitlaat. Het regelbare ventilatieoppervlak (de luchtinlaat) was 0,227 m² per dier bij locatie 1 (G1), en 0,21 m² per dier bij locatie 2 (G2). Beide locaties waren zogenaamde potstallen met vier strooiselruimtes: bij locatie G2 waren 2 voergangen met aan beide kanten 1 pot, bij G1 waren vier aparte potten, maar geen voergang aanwezig (de dieren werden op aangewezen voerplekken gevoerd). Op beide locaties hadden de dieren ca. 1,3 m² per dier beschikbaar. De potten werden op beide locaties elke 2-3 maanden (deels) leeggehaald. Bij locatie G1 werd dagelijks circa 600 kg tarwestro ingestrooid, bij G2 werd circa 1050 kg stro ingestrooid.

Tabel 1 Selectie van kenmerken van de bemeten meetlocaties. G1: locatie 1; G2: locatie 2.

| Kenmerken | G1 | G2 |
|---|--|---|
| Aantal dierplaatsen | 900 | 900 |
| Oriëntatie van de stal | ZW-NO | N-Z |
| Afmetingen stal | | |
| Lengte [m] x Breedte [m] | 65 x 26 | 75,6 x 27,4 |
| Goot- en nokhoogte [m] | Goothoogte: 3 m Nokhoogte: 9 m | Goothoogte: 2,5 m Nokhoogte: 7,5 m |
| Inhoud [m ³ /dier] | 9,2 | 15,75 |
| Leefruimte | | |
| Pot (aantal ruimtes) | 4 | 4 |
| Loopoppervlak (pot; m ² per dier) | 1,3 | 1,27 |
| Oppervlakte wachtruimte (m ² per dier) | --- | 0,4 |
| Pot bijstrooien | Dagelijks circa 600 kg tarwestro ingestrooid | Dagelijks circa 1050 kg stro ingestrooid |
| Pot uitmesten | Om de 2-3 maanden wordt een deel van de potruimtes uitgemest | Om de 2-3 maanden wordt een deel van de potruimtes uitgemest |
| Ventilatie | | |
| Beschrijving | Natuurlijk geventileerd, met ventilatieopeningen [1,7 m hoog] aan beide zijden van de stal | Natuurlijk geventileerd, met ventilatieopeningen [1,25 m hoog] aan beide zijden van de stal |
| Ventilatieoppervlak [m ² /dierplaats] | 0,227 | 0,21 |
| Melken ¹ | | |
| Melktijden 's ochtends | 7.30 – 11.00 | 5:00 – 7:45 |
| 's avonds | 19.30 – 23.00 | 16:00 – 18:30 |
| Melkgift [kg/dier/dag] | 3,1 | 3,5 |
| Vet [%] | 4,1 | 4,2 |
| Eiwit [%] | 3,5 | 3,6 |
| Uremgehalte [mg/100g] | 29,6 | 24,7 |
| Rantsoen ¹ | | |
| Melkgeiten: Voeropname (kg ds/dier/dag) | 2,7 | Onbeperkt |
| Aandeel gras/kuilgras (%) | 31 | 3 |
| Opfoklammeren: Voeropname (kg ds/dier/dag) | 2,4 | Onbeperkt |
| Aandeel gras/kuilgras (%) | 36 | Onbeperkt |

¹ Jaargemiddelden (2019-2020) voor G1, jaargemiddelden (2020) voor G2

2.2 Metingen

2.2.1 Meetstrategie

De emissies van NH_3 , CH_4 en N_2O (voor zowel de continue- als voor de referentiemetingen) zijn volgens de tracergas ratiomethode bepaald met CO_2 als door dier en mest geproduceerde tracergas (zie hoofdstuk 2.3). Deze methode vereist nauwkeurige metingen van de concentraties van het te meten gas (NH_3 , CH_4 , N_2O) in zowel de lucht die de afdeling verlaat (stallucht) als de binnenkomende lucht (buitenlucht). Hoewel de CO_2 in de stal niet direct bijdraagt aan het broeikasgaseffect (korte keten), wordt CO_2 -productie in dit onderzoek wel gemeten omdat het nodig is voor het vaststellen van de debieten om de emissies van NH_3 , CH_4 en N_2O te kunnen berekenen.

Voor de metingen in de stal is op beide meetlocaties in de lengte van de stal, ongeveer in het midden (zowel qua hoogte als stalbreedte), een monsternameleiding (polyethyleen (PE) of Teflon) met een aantal bemonsteringspunten geplaatst. Zo wordt een gemengd luchtmonster met een gemiddelde stalluchtconcentratie genomen (Figuur 2.1). Het aantal bemonsteringspunten in deze leiding is afhankelijk van de lengte van de stal, met als voorwaarde een maximale afstand tussen bemonsteringspunten van 10 meter. Alle bemonsteringspunten zijn voorzien van kritische openingen en voorzien van een stoffilter (Figuur 2.1) om een constante en gecontroleerde monsternameflow door alle meetpunten mogelijk te maken. De aangezogen flow per meetpunt varieerde (tussen bedrijven) tussen 400-500 ml/min. De monsternameleiding is aangesloten op een meetbuis, waar de meetapparatuur voor continue concentratiemetingen is geplaatst. Op de meetbuis zijn een aantal tappunten aangebracht om bij de referentiemetingen dezelfde lucht te bemonsteren als bij de continue metingen. De stallucht wordt met behulp van een pomp (LABOPORT® Membraan vacuümpomp model N840.1.2FT.18, KNF Verder BV) via de monsternameleiding en meetbuis aangezogen. Met de gebruikte pomp en kritische openingen wordt altijd een overflow gegarandeerd die voldoende is om, gelijktijdig aan de continue metingen ook de referentiemetingen uit te kunnen voeren. De apparatuur (meetbuis, evenals de CO_2 -, CH_4 - en NH_3 -meetinstrumenten voor stalluchtconcentraties), is op een zolder in de stal, in een schone ruimte (e.g. tanklokaal of kantoor), of in een industriële meetkast in de stal geplaatst.



Figuur 2.1 Meetopstelling met monsternameleiding. Links: voorbeeld monsternameleiding met monsternamepunten in de stal. Rechts: voorbeeld van monsternamepunt met kritische opening en stoffilter.

De CO₂-concentraties in de buitenlucht zijn continue gemeten met een aparte sensor (zie 2.2.2.1) en werden, na kalibratie (lab- en veldkalibratie; zie hoofdstuk 2.2.2 Meetapparatuur), gebruikt voor de emissieberekeningen. De NH₃- en CH₄-concentraties in de buitenlucht zijn niet continue gemeten. Aangezien de buitenluchtconcentraties nodig zijn voor de bepaling van de emissies op dagbasis (zie hoofdstuk 2.3), is de volgende procedure (gebaseerd op de concentraties die gemeten zijn tijdens de referentiemetingen) toegepast om op dagbasis een waarde voor de buitenluchtconcentraties van NH₃ en CH₄ te bepalen:

1. Een meetperiode wordt gedefinieerd als de periode tussen 2 referentiemetingen. Aan het begin van een meetperiode is een referentiemeting voor de buitenluchtconcentraties uitgevoerd, aan het einde van de meetperiode is ook een referentiemeting voor de buitenluchtconcentraties uitgevoerd.
2. Voor alle meetdagen in de meetperiode tussen die twee referentiemetingen wordt de buitenluchtconcentratie gelijk gesteld aan de gemiddelde waarde van die twee referentiemetingen.

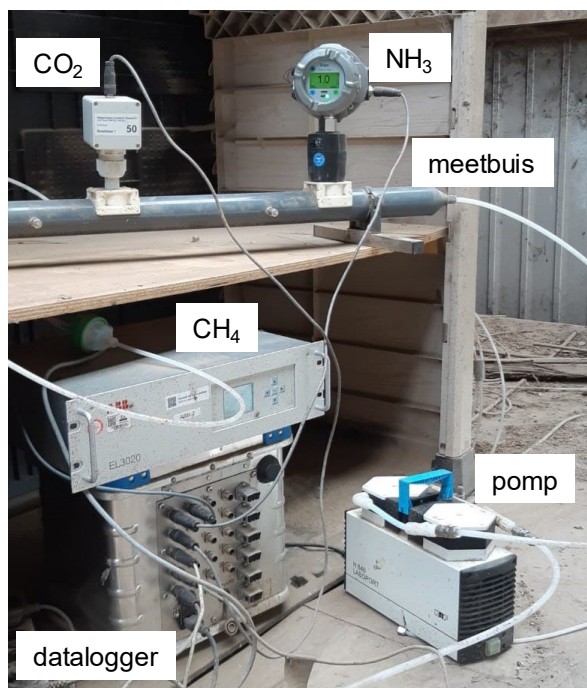
2.2.2 Meetapparatuur

2.2.2.1 Meetapparatuur voor continue metingen (concentraties)

Voor de continue metingen zijn door WLR de volgende instrumenten gebruikt (Figuur 2.2):

- NH₃: Dräger Polytron® 8000 (Dräger Safety AG & Co. KGaA, Duitsland). Deze elektrochemische sensoren zijn via openingen in de meetbuis geplaatst, zodat in de stroom van het gemengde stallucht in de meetbuis de lucht passief bemonsterd kan worden.
- CO₂: Vaisala CARBOCAP® Carbon Dioxide Probe GMP252 (Vaisala GmbH, Duitsland). Deze NDIR (Non-Dispersive Infrared) sensoren zijn via openingen in de meetbuis geplaatst, zodat ze in de stroom van de gemengde stallucht in de meetbuis de lucht passief kan worden bemonsterd.
- CH₄: ABB-Uras26 (ABB, Duitsland). Deze NDIR monitoren zijn via een PE-slang bij één van de tappunten in de meetbuis aangesloten. Via een interne pomp wordt lucht uit de meetbuis met een flow van ca. 1L/min aangezogen en door de meetcel in de monitor geleid om de CH₄-concentratie te bepalen.

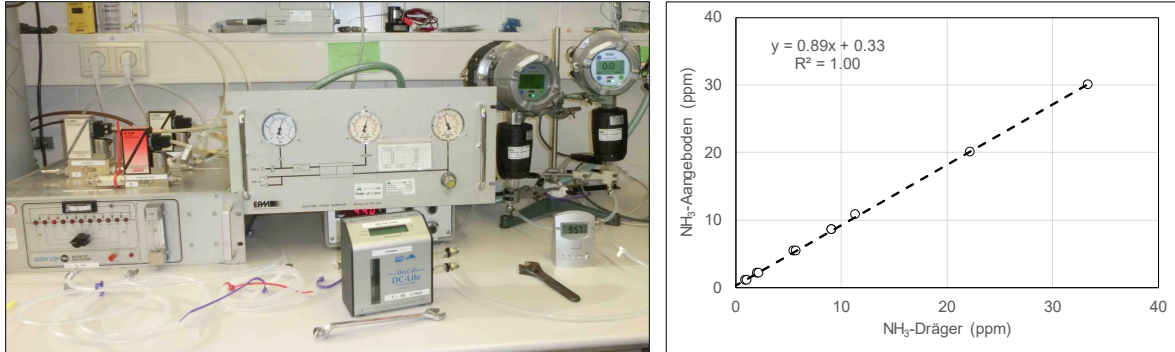
De gemeten concentraties (inclusief het signaal uit de meetwaaiers) in de stal werden elke 5 minuten in een datalogstelsel (CR1000X; Campbell Scientific Inc., Logan, VS) opgeslagen.



Figuur 2.2 Meetopstelling WLR voor continue metingen.

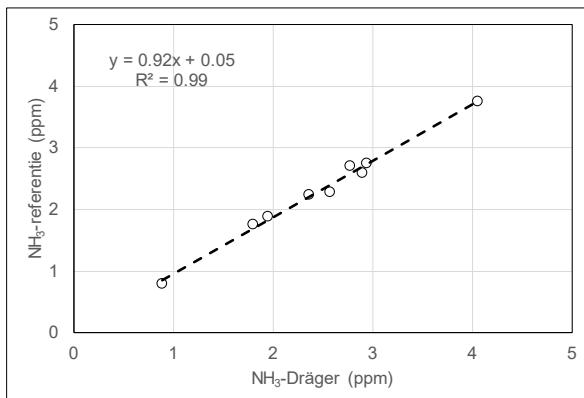
In Bijlage 2 worden deze instrumenten en het bijbehorende meetprincipe kort beschreven. Alle instrumenten zijn op twee verschillende manieren gecontroleerd:

- In het laboratorium is een labkalibratie uitgevoerd (Figuur 2.3). De instrumenten zijn in het lab tegen standaard kalibratiegassen (gouden standaard) gekalibreerd. Met behulp van een verdunningsapparaat zijn van de standaard kalibratiegassen verschillende concentraties aangemaakt en aan de meetinstrumenten aangeboden. Op basis van het signaal van de meetinstrumenten en de aangeboden concentratie (kalibratiegassen) werd per instrument een lineaire regressieanalyse ($y = a * x + b$) uitgevoerd om de parameters a en b te bepalen.



Figuur 2.3 Links: Meetopstelling voor de kalibratie van NH₃ Dräger-sensoren in het Air Quality Laboratorium (AQL) van Wageningen Livestock Research (WLR). Rechts: regressielijn voor één van de NH₃ Dräger-sensoren.

- In de praktijk is een veldkalibratie uitgevoerd. De instrumenten zijn in de praktijk tegen referentieapparatuur (zie hoofdstuk 2.2.2.2) gekalibreerd. Zoals in hoofdstuk 2.2.1 is aangegeven, zijn op de meetbuis (waar de apparatuur voor continue metingen zijn aangesloten) een aantal tappunten aangebracht om tijdens de referentiemetingen dezelfde lucht te bemonsteren als bij de continue metingen. Op basis van het gemeten signaal van de meetinstrumenten, gecorrigeerd voor de labkalibratie en omgezet naar een concentratiewaarde, en de gemeten concentraties door de referentieapparatuur tijdens de referentiemetingen, is een lineaire regressieanalyse ($y = a * x + b$; Figuur 2.4) uitgevoerd om de parameters a en b te bepalen. Deze regressielijn wordt dan gebruikt om de concentraties bij de continue metingen te corrigeren (kalibreren).



Figuur 2.4 Regressielijn (veldkalibratie) van een van de NH₃ Dräger-sensoren in de praktijk.

2.2.2.2 Meetapparatuur voor referentiemetingen (concentraties)

Minimaal zesmaal, verdeeld over een jaar zijn door WLR op alle meetlocaties in zowel de stallucht als in de binnenkomende (buiten)lucht concentratiemetingen met een minimum duur van 24 uur volgens referentiemethoden uitgevoerd. Deze referentiemetingen zijn voor elk meetpunt in duplo uitgevoerd. De volgende referentiemethoden zijn gebruikt:

- NH₃: nat-chemische methode (Figuur 2.5) volgens Mosquera e.a. (2019), met spectrofotometrische bepaling in het laboratorium van Wageningen Livestock Research (WLR).
- CO₂, CH₄ en N₂O: longmethode (Figuur 2.6) volgens Mosquera e.a. (2020) met analyse van de monsterlucht met gaschromatografie in het laboratorium van WLR.



Figuur 2.5 Meetopstelling WLR voor NH_3 -referentiemetingen. Links: wasflessen. Midden: Droge gasstroommeter (DryCal® Defender 510-m, Bios Int. Corp, VS). Rechts: pomp (Thomas Industries Inc., model 617CD32, Wabasha, Minnesota, VS), monsternameleiding (teflon of polyethyleen) en kritische openingen (borosilicaatglas (diameter: 8 mm; lengte: 80 mm), gehuisvest in a roestvrijstaal container voor bescherming).



Figuur 2.6 Meetopstelling WLR voor broeikasgas-referentiemetingen (via longmethode). Gesloten vaten met 40 liter Nalophan monsternamezakken voor luchtmonstering, monsternameleiding (teflon of polyethyleen) en kritische openingen (borosilicaatglas (binnendiameter: 8 mm; lengte: 80 mm), ondergebracht in een roestvrijstalen container voor bescherming; flow: ~ 20 ml/min). Lucht wordt met behulp van een pomp (Thomas Industries Inc., model 617CD32, Wabasha, Minnesota, VS) uit het vat gezogen, waardoor de lucht in de zakken wordt aangezogen.

2.2.2.3 Meetapparatuur voor binnen- en buitenklimaat

- Klimaatgegevens (temperatuur (°C) en relatieve luchtvochtigheid (%)) in de stallucht (1 meetpunt midden in de stal) werden continu gemeten met behulp van temperatuur- en vochtsensoren (Vaisala HMP60; Vaisala GmbH, Duitsland).
- De klimaatgegevens buiten de stal (temperatuur, relatieve luchtvochtigheid, windsnelheid, windrichting) werden uit de dichtstbijzijnde KNMI-weerstation opgehaald.

De gemeten binnenklimaatgegevens werden elke 5 minuten in een datalogysysteem (CR1000X; Campbell Scientific Inc., Logan, VS) opgeslagen.

2.2.3 Management en diergegevens

Gedurende de gehele onderzoeksperiode zijn elke twee weken op beide meetlocaties de volgende gegevens geregistreerd:

- Aantal aanwezige dieren in de stal (melkgeiten, bokken, opfoklammeren).
- Gemiddelde gewicht van de dieren in de stal.
- Melkproductie en -samenstelling
- Rantsoen
- Is (een deel van) de pot uitgemest? Zo ja, datum van uitmesten, welk deel van de pot is uitgemest, en hoeveelheid (m^3) mest (pot) uit de stal

2.3 Verwerking gegevens

2.3.1 Emissieberekening

De emissies van NH₃, CH₄ en N₂O (E_{ij}; in kg/jaar per dierplaats) werden per meetdag (i=1, 2, ..., n), en bedrijf (j=1, 2) bepaald op basis van de geschatte CO₂-productie in de stal (PCO_{2ij}; in m³ CO₂/uur), en de gemiddelde concentratie (24-uursgemiddelde) in de uitgaande lucht (C^{stal}_{ij}; in mg/m³) en in de ingaande lucht (C^{buiten}_{ij}; in mg/m³) van CO₂ en NH₃ (of CH₄, of N₂O) volgens:

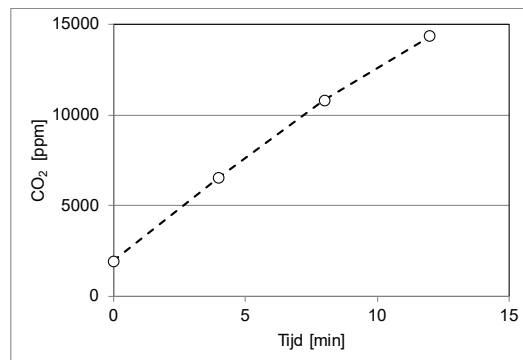
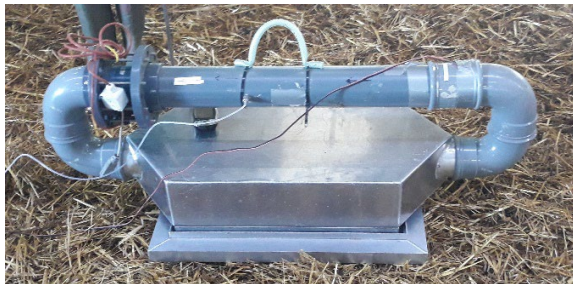
$$E_{ij} = PCO_{2ij} * \frac{C_{ij}^{stal} - C_{ij}^{buiten}}{(CO_2)_{ij}^{stal} - (CO_2)_{ij}^{buiten}} * \frac{1 \text{ kg}}{10^6 \text{ mg}} * \frac{24 \text{ uur}}{1 \text{ dag}} * \frac{365 \text{ dagen}}{1 \text{ jaar}} * \frac{1}{\text{dierplaatsen}}$$

Voor geiten wordt geen leegstand verrekend (Groenestein en Aarnink, 2008).

Voor geiten zijn er aanvullende metingen nodig om de CO₂-productie uit de stal te bepalen, aangezien niet alleen de dieren maar ook de pot een aanzienlijke bron van CO₂ kan zijn:

$$PCO_{2i} = PCO_{2i}(\text{dieren}) + PCO_{2i}(\text{pot})$$

De CO₂-productie uit de pot is tijdens de referentiemetingen bepaald door gebruik te maken van de statische fluxkamer methode. Bij deze methode wordt een deel van de pot met een gesloten box afgesloten (Figuur 2.7; zie Bijlage 2 voor aanvullende informatie), waardoor de CO₂-concentratie in de box zal toenemen. De toename in concentratie is een mate van de CO₂-productie uit dat deel van de pot. Om rekening te houden met de ruimtelijke variatie in CO₂-productie uit de pot wordt deze procedure op verschillende plekken in de stal toegepast, waardoor een gemiddelde CO₂-productie uit de pot kan worden bepaald. Voor de boxmetingen is een fotoakoestische multigas monitor (Innova 1312; LumaSense Technologies, Ballerup, Denmark) gebruikt (zie Bijlage 2).



Figuur 2.7 Boxmetingen bij geitenstallen om de CO₂-productie uit de pot te bepalen. Links: meetopstelling. Rechts: voorbeeld van toename in CO₂-concentratie

De CO₂-productie uit de dieren in de stal wordt berekend met behulp van de CIGR rekenregels (Pedersen and Sällvik, 2002; Pedersen e.a., 2008), op basis van het gemiddelde gewicht van de dieren (*m*; kg), en de melkproductie (*Y*₁; kg melk/dag per dier).

$$PCO_2(\text{melkgeiten}) = a * (5,5 * m^{0,75} + 13 * Y_1) / 1000$$

$$PCO_2(\text{bokken}) = a * (5,5 * m^{0,75}) / 1000$$

$$PCO_2(\text{opfoklammeren}) = a * (6,3 * m^{0,75}) / 1000$$

De parameter *a* geeft aan wat de verwachte CO₂-productie per hpu is: voor metingen op stalniveau (zonder pot-bijdrage) wordt een waarde *a*=0,185 m³ CO₂/uur per hpu aangenomen. Melkproductie (en -samenstelling) wordt altijd gemeten en gerapporteerd, diergewicht wordt bij voorkeur op basis van metingen op de meetlocaties vastgesteld. Wanneer diergewicht niet bekend is, worden de standaardwaarden van Tabel 2 voor het CO₂-productiemodel gebruikt.

Tabel 2 Diergewicht: Standaardwaarden voor de CO₂-productiemodel

| Diercategorie | Gewicht [kg] |
|---------------|--------------|
| Melkgeiten | 75 |
| Bokken | 95 |
| Opfoklammeren | 50 |

De totale CO₂-productie in de stal uit de dieren (m³ CO₂/uur; standaardtemperatuur van 20 °C) wordt bepaald als:

$$PCO_2(\text{dieren}) = PCO_2(\text{melkgeiten}) * \text{aantal melkgeiten} \\ + PCO_2(\text{bokken}) * \text{aantal bokken} \\ + PCO_2(\text{opfoklammeren}) * \text{aantal opfoklammeren}$$

Aangezien tijdens de metingen de staltemperatuur (t_{stal}) anders is dan 20°C, moet een correctiefactor worden toegepast om de werkelijke CO₂-productie PCO₂ in de stal te bepalen:

$$PCO_2(\text{dieren}) = PCO_2(\text{dieren}) * (1000 + 12 * (20 - t_{\text{stal}})) / 1000$$

2.3.2 Statistische analyse

Voor de bepaling van de variatiecomponenten voor de variatie binnen en tussen bedrijven is gebruik gemaakt van de 'REML (REsidual Maximum Likelihood) directive' van het statistische pakket Genstat 19th Edition (VSI, 2018). Het volgende statistisch model is toegepast:

$$Y_{ij} = C + \sigma^2(L_i) + \sigma^2(R_{ij})$$

- Y_{ij} = Responsvariabel (op Ln-schaal), de waargenomen emissie op bedrijf i tijdens meetdag j
 C = Constante, de gemiddelde emissie (op Ln-schaal)
 $\sigma^2(L_i)$ = Variantiecomponent behorende bij de verdeling van bedrijven i, in eenheden van Y
 $\sigma^2(R_{ij})$ = Variantiecomponent die de restterm beschrijft voor de waarnemingen op bedrijf i tijdens meetdag j, in eenheden van Y

De variatie binnen (σ_{binnen}) en tussen (σ_{buiten}) bedrijven wordt als volgt geschat:

$$\sigma_{\text{binnen}} = \sqrt{\sigma^2(R_{ij})}$$

$$\sigma_{\text{tussen}} = \sqrt{\sigma^2(L_{ij})}$$

3 Resultaten en discussie

In de periode van december 2018 – oktober 2020 zijn in twee natuurlijk geventileerde geitenstallen (op twee verschillende bedrijven) continue metingen uitgevoerd om de emissies van NH₃ en CH₄ te bepalen. Daarnaast zijn per locatie een aantal referentiemetingen uitgevoerd volgens de richtlijnen van huidige meetprotocollen (Ogink et al., 2017; VERA, 2018). Voor geiten betekent dit dat de metingen over het jaar evenredig verdeeld moeten worden. In Tabel 3 en Figuur 3.1 zijn de gemiddelde meetomstandigheden voor zowel de continue als de referentiemetingen voor beide stallocaties bijeen gezet. In Bijlage 1 worden voor beide stallocaties de data waarop referentiemetingen zijn uitgevoerd, de gemiddelde klimaat- en managementgegevens en de resultaten van de referentiemetingen weergegeven.

De gerapporteerde resultaten hebben betrekking op metingen die in de periode 27/11/2018 – 03/11/2020 bij bedrijf 1 (G1) en in de periode 28/02/2019 – 03/11/2020 bij bedrijf 2 (G2) zijn uitgevoerd. In deze perioden zijn er minimaal elf referentiemetingen bij zowel G1 als bij G2 uitgevoerd, verdeeld over de verschillende seizoenen (Figuur 3.1). De gemiddelde dag in het jaar bij de referentiemetingen was 171 bij G1, en 179 bij G2.

Tijdens de referentiemetingen waren bij G1 de gemiddelde buitentemperatuur (T: 9,8 °C; Tabel 3) en relatieve luchtvochtigheid (RV: 73%) lager, en de windsnelheid (WS: 3,4 m/s) vergelijkbaar met de langdurige 10-jaargemiddelden (2009-2018) bij het dichtstbijzijnde KNMI-weerstation (De Bilt; T: 10,6 °C; RV: 80%; WS: 3,4 m/s). Voor de continue metingen was bij G1 de gemiddelde buitentemperatuur (T: 11,6 °C) hoger dan, de relatieve luchtvochtigheid (RV: 77%) iets lager dan, en de windsnelheid (WS: 3,5 m/s) vergelijkbaar met de langdurige 10-jaargemiddelde.

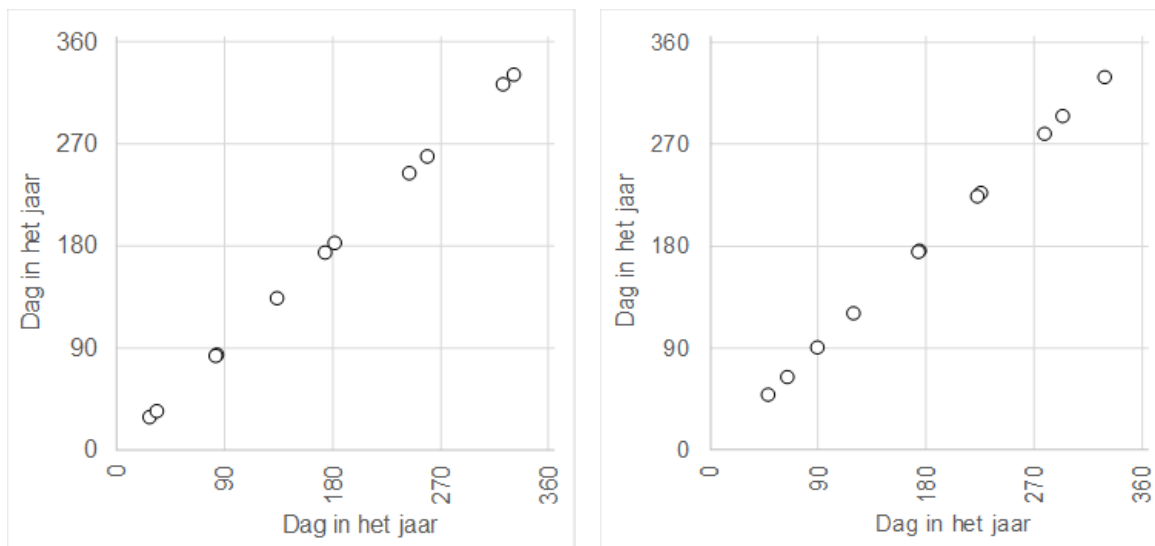
Tijdens de referentiemetingen was de gemiddelde buitentemperatuur bij G2 (T: 14,3 °C; Tabel 3) hoger dan, de relatieve luchtvochtigheid (RV: 75%) iets lager dan, en de windsnelheid (WS: 3,5 m/s) vergelijkbaar met de langdurige 10-jaargemiddelden (2009-2018) bij het dichtstbijzijnde KNMI-weerstation (De Bilt; T: 10,6 °C; RV: 80%; WS: 3,4 m/s). Voor de continue metingen was bij G2 de gemiddelde buitentemperatuur (T: 12,5 °C) hoger dan, de relatieve luchtvochtigheid (RV: 76%) iets lager dan, en de windsnelheid (WS: 3,5 m/s) vergelijkbaar met de langdurige 10-jaargemiddelde.

Gemiddeld over alle metingen (zowel voor continue- als voor referentiemetingen en voor beide bedrijven) lag de CO₂-concentratie in de stal onder de 3000 ppm (Tabel 3).

Tabel 3 Gemiddelde waarden (tussen haakjes minimum en maximum waarden) van een aantal klimaatparameters. G1: bedrijf 1; G2: bedrijf 2.

| Kenmerken | G1 | | G2 | |
|---|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| | Continue | Referentie | Continue | Referentie |
| T-binnen (°C) | 16,0 (4,4 : 31,0) | 14,0 (7,5 : 23,4) | 17,8 (6,9 : 32,9) | 19,3 (11,8 : 29,5) |
| RV-binnen (%) | 69 (38 : 88) | 66 (41 : 78) | 65 (32 : 87) | 63 (48 : 80) |
| T-buiten (°C) ¹⁾ | 11,6 (-2,5 : 29,0) | 9,8 (2,8 : 18,7) | 12,5 (-0,1 : 29,0) | 14,3 (4,0 : 26,5) |
| RV-buiten (%) ¹⁾ | 77 (38 : 99) | 73 (43 : 88) | 76 (38 : 99) | 75 (57 : 93) |
| Windsnelheid op 10 m hoogte (m/s) ¹⁾ | 193 (26 : 345) | 219 (55 : 309) | 191 (26 : 338) | 195 (90 : 308) |
| CO ₂ stal (ppm) | 829 (549 : 1302) | 814 (660 : 960) | 974 (529 : 1717) | 940 (537 : 1401) |

¹⁾ het langdurig 10 jaar gemiddelde (2009-2018) bij het dichtstbijzijnde KNMI-weerstation bij De Bilt was T: 10,6 °C; RV: 80%; WS: 3,4 m/s).

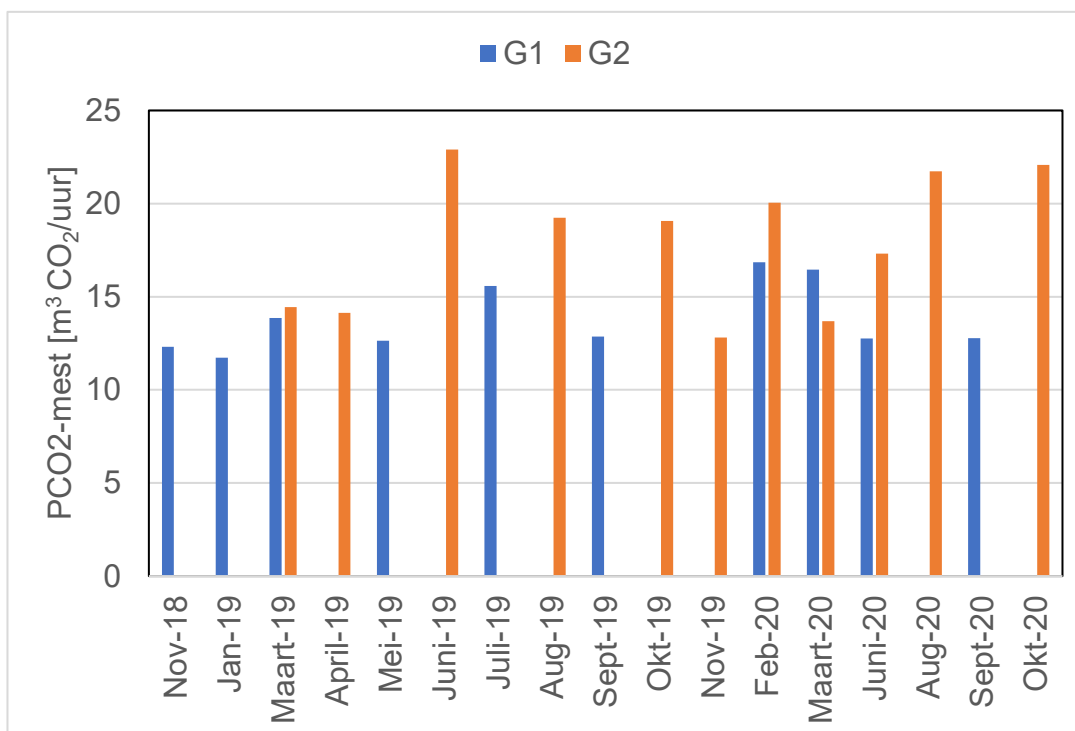
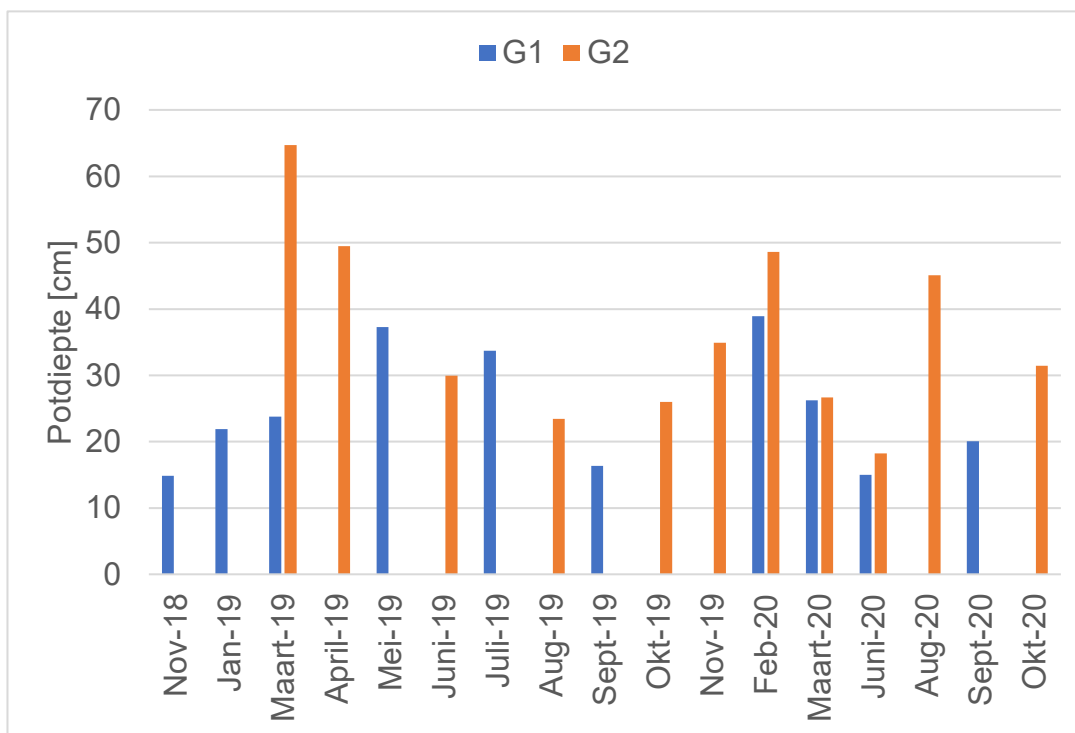


Figuur 3.1 Verdeling van de metingen over de seizoenen. Links: bedrijf 1 (G1); Rechts: bedrijf 2 (G2).

In Tabel 4 en Figuur 3.2 (boven) wordt voor beide geitenbedrijven de potdiepte de dag vóór of na de referentiemetingen weergegeven. De potdiepte is bepaald als gemiddelde van metingen op 12-18 plekken in de stal op de plaats waar ook de boxmetingen zijn uitgevoerd voor de bepaling van de CO₂-productie uit de pot, verdeeld over de verschillende potgedeelten (zie Tabel 4 en Figuur 3.2 (onder)). Voor beide bedrijven is duidelijk te zien dat de potdiepte toenam in de herfst en de winter, en afnam in de lente en zomer. De pot was bij bedrijf 2 over het algemeen dieper dan bij bedrijf 1. Bij bedrijf 1 zijn potdiepte en CO₂-productie gecorreleerd, dit is bij bedrijf 2 niet het geval. Uit Tabel 4 kan worden geconcludeerd dat de bijdrage uit de pot aan de totale CO₂-productie in de stal aanzienlijk is (gemiddeld 40% hogere CO₂-productie voor bedrijf 1, en 60% voor bedrijf 2).

Tabel 4 Potdiepte, mestvolume, en totaal CO₂-productie uit dieren en mest gemeten tijdens de referentiemetingen en boxmetingen.

| Locatie | Meting | [cm] | [m ³] | [m ³ CO ₂ /uur] | | PCO ₂ -mest/PCO ₂ - |
|---------|--------|-----------|-------------------|---------------------------------------|------------------------|---|
| | | Potdiepte | Mestvolume | PCO ₂ -dieren | PCO ₂ -mest | dieren [%] |
| G1 | 1 | 14,9 | 174 | 32,9 | 12,3 | 37 |
| G1 | 2 | 21,9 | 256 | 34,1 | 11,7 | 34 |
| G1 | 3 | 23,8 | 278 | 34,8 | 13,9 | 40 |
| G1 | 4 | 37,3 | 436 | 37,0 | 12,6 | 34 |
| G1 | 5 | 33,7 | 394 | 32,7 | 15,6 | 48 |
| G1 | 6 | 16,3 | 191 | 32,8 | 12,9 | 39 |
| G1 | 7 | 38,9 | 455 | 36,7 | 16,9 | 46 |
| G1 | 8 | 26,3 | 307 | 36,0 | 16,4 | 46 |
| G1 | 8 | 15,0 | 176 | 32,5 | 12,8 | 39 |
| G1 | 10 | 20,1 | 235 | 32,1 | 12,8 | 40 |
| G2 | 1 | 64,7 | 740 | 34,6 | 14,4 | 42 |
| G2 | 2 | 49,5 | 565 | 32,4 | 14,1 | 44 |
| G2 | 3 | 29,9 | 342 | 28,9 | 22,9 | 79 |
| G2 | 4 | 23,4 | 268 | 31,7 | 19,2 | 61 |
| G2 | 5 | 26,0 | 297 | 29,9 | 19,1 | 64 |
| G2 | 6 | 34,9 | 399 | 30,6 | 12,8 | 42 |
| G2 | 7 | 48,6 | 556 | 28,6 | 20,0 | 70 |
| G2 | 8 | 26,7 | 305 | 34,3 | 13,7 | 40 |
| G2 | 9 | 18,3 | 209 | 28,4 | 17,3 | 61 |
| G2 | 10 | 45,1 | 515 | 26,7 | 21,7 | 81 |
| G2 | 11 | 31,4 | 359 | 31,0 | 22,1 | 71 |



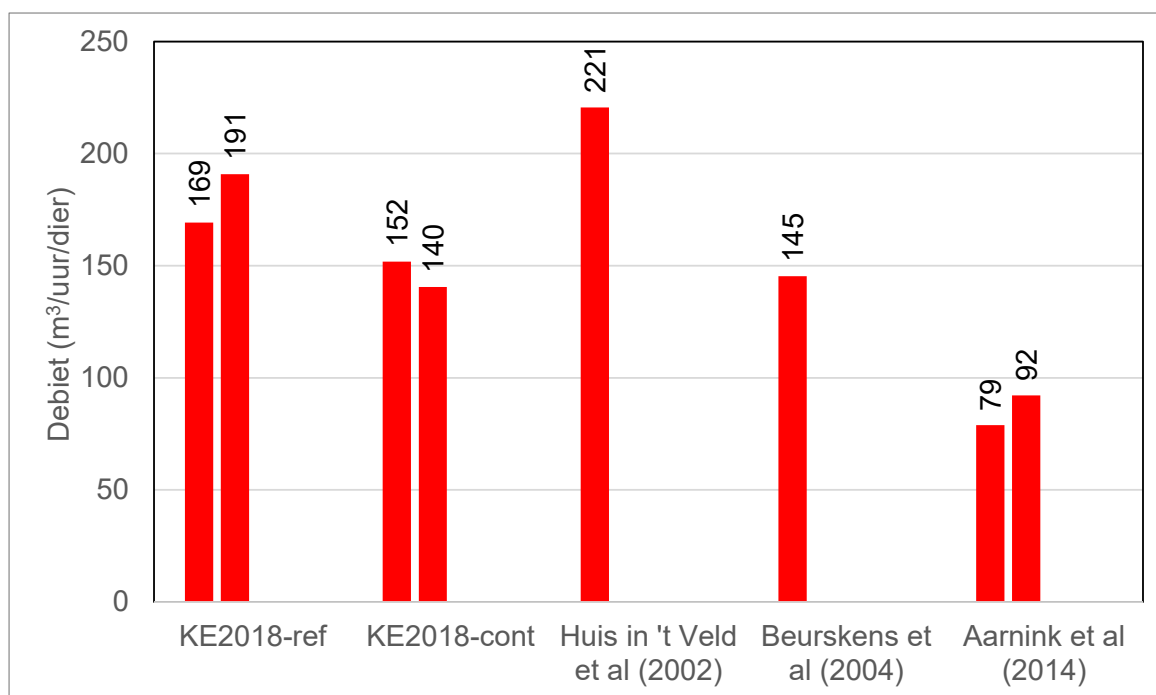
Figuur 3.2 Gemiddelde potdiepte (boven) en CO₂-productie uit de pot (onder). G1: bedrijf 1; G2: bedrijf 2.

In Tabel 5 en Figuur 3.3 worden de gemiddelde waarden voor het ventilatiedebiet van zowel de continue als de referentiemetingen voor de gemeten afdelingen weergegeven. Er zijn geen significante verschillen gevonden tussen de continue en de referentiemetingen, en tussen de bedrijven. Het ventilatiedebiet bij G1 en G2 was lager dan de waarden (gemiddeld 221 m³/uur/dier) die gerapporteerd zijn in Huis in 't Veld et al. (2002) bij continue metingen aan één natuurlijk geventileerde geitenstal gedurende twee perioden (93 dagen in de zomer: debiet 283 m³/uur/dier; 147 dagen in de winter: debiet 158 m³/uur/dier). De resultaten in onderhavige studie zijn vergelijkbaar met de waarden gerapporteerd in Beurskens et al. (2004) bij metingen (10 referentiemetingen) in het najaar (oktober-december) bij een natuurlijk geventileerde geitenstal. Het ventilatiedebiet was hoger dan die gerapporteerd in Aarnink et al. (2014) bij metingen op twee natuurlijk geventileerde geitenstallen (79 en 92 m³/uur per dier). Er zijn twee mogelijke redenen om

het lage ventilatiedebiet in Aarnink et al. (2014) te verklaren. Ten eerste, de metingen zijn voornamelijk in het najaar en winter uitgevoerd (september t/m maart; alleen één van de zes metingen is in de zomer uitgevoerd). Daarnaast is in Aarnink et al. (2014) de tracergas ratiomethode (met CO₂ als natuurlijk (door dieren en mest) geproduceerd tracergas) gebruikt. Echter, in Aarnink et al. (2014) is de bijdrage van de pot niet gemeten, waardoor het gerapporteerde ventilatiedebiet een onderschatting is van het werkelijke debiet (zie Tabel 4: gemiddeld over de twee bemeten bedrijven is de bijdrage uit de pot 50% van de CO₂-productie uit de dieren). In zowel Huis in 't Veld et al. (2002) als in Beurskens et al. (2004) is de interne tracergas ratiomethode (met SF₆ als tracergas) toegepast en speelt dit geen rol.

Tabel 5 Gemiddelde waarden (tussen haakjes minimum en maximum waarden) van het ventilatiedebiet en de emissies van CH₄, NH₃ en N₂O voor zowel continue- als referentiemetingen bij de gemeten stallen. G1: bedrijf 1; G2: bedrijf 2. Voor geiten wordt geen leegstand verrekend (Groenestein en Aarnink, 2008).

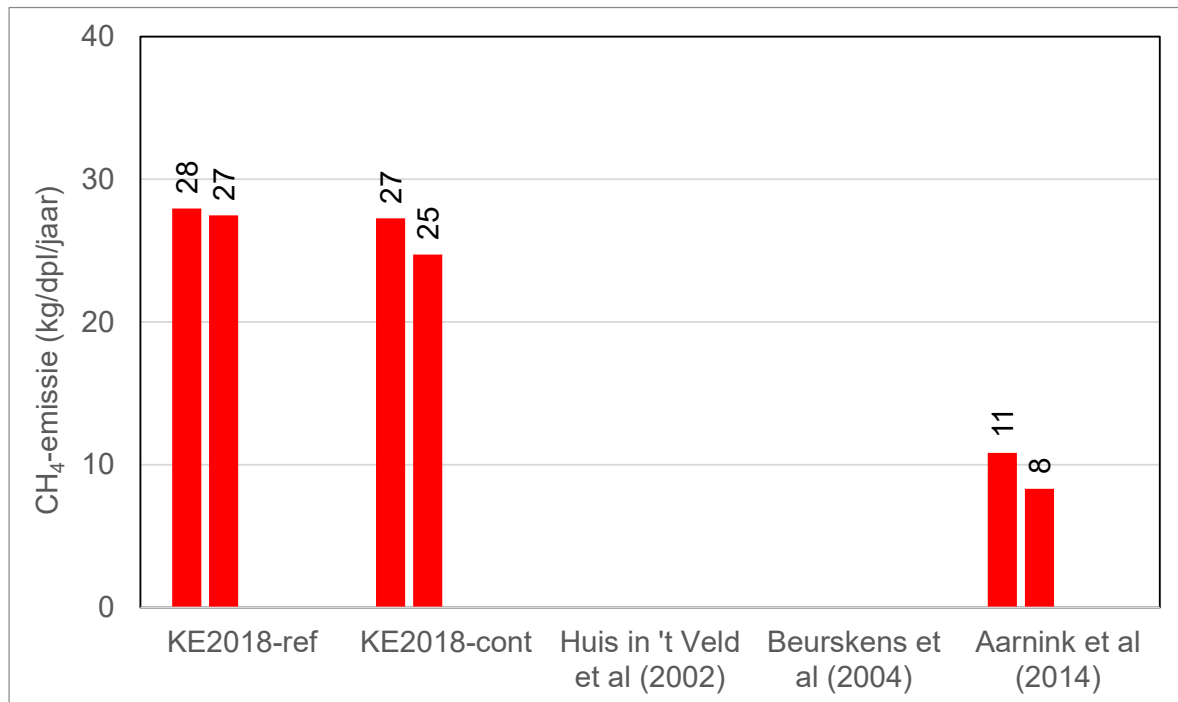
| Kenmerken | G1 | | G2 | |
|---|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|
| | Continue | Referentie | Continue | Referentie |
| Aantal meetdagen | 707 | 11 | 609 | 11 |
| Ventilatiedebiet (m ³ /uur/dier) | 152 (58 : 427) | 169 (107 : 278) | 140 (40 : 816) | 185 (59 : 671) |
| NH ₃ -emissie (kg/jaar per dpl) | 3,8 (1,3 : 8,8) | 3,7 (1,6 : 6,7) | 3,6 (1,0 : 7,9) | 3,6 (1,9 : 5,3) |
| CH ₄ -emissie (kg/jaar per dpl) | 27 (15 : 56) | 28 (19 : 38) | 25 (12 : 51) | 27 (19 : 42) |
| N ₂ O-emissie (g/jaar per dpl) | --- | 0,05 (0,01 : 0,19) | --- | 0,07 (0,01 : 0,35) |



Figuur 3.3 Ventilatie-debiet (m³/uur/dier) voor de gemeten afdelingen in dit onderzoek tijdens de referentiemetingen (KE2018-ref) en de continue metingen (KE2018-cont). In de figuur worden ook de waarden weergegeven die in eerdere onderzoeksrapporten zijn gerapporteerd.

In Figuur 3.4 en Tabel 5 worden de gemiddelde CH₄-emissies voor zowel de continue als de referentiemetingen voor de gemeten afdelingen weergegeven. Op basis van alle meetgegevens (continue metingen) werd voor G1 een gemiddelde methaanemissie (\pm standaarddeviatie tussen metingen) berekend van 27 ± 6 kg/jaar per dierplaats. Op basis van de referentiemetingen was de gemiddelde methaanemissie 28 ± 6 kg/jaar per dierplaats. Op basis van alle meetgegevens (continue metingen) werd voor G2 een gemiddelde methaanemissie (\pm standaarddeviatie tussen metingen; emissies gecorrigeerd voor leegstand) berekend van 25 ± 5 kg/jaar per dierplaats. Op basis van de referentiemetingen was de gemiddelde methaanemissie 27 ± 7 kg/jaar per dierplaats. Bij de bepaling van deze emissies is geen leegstand verrekend (Groenestein en Aarnink, 2008).

Er zijn geen significante verschillen gevonden tussen de emissies die bepaald zijn door middel van continue metingen, en op basis van de referentiemetingen. Er zijn ook geen significante verschillen tussen bedrijven gevonden. Op basis van de continue metingen was de variatiecoëfficiënt tussen bedrijven <5%, en de variatiecoëfficiënt binnen bedrijven 22%. De gemiddelde methaanemissie bij G1 en G2 is significant hoger dan de gemiddelde emissie gerapporteerd in Aarnink et al. (2014) bij metingen aan twee natuurlijk geventileerde geitenstallen ($9,6 \pm 1,8$ kg/jaar per dierplaats). De methaanemissie is ook hoger dan de emissies die door Nederland (Ruysenaars et al., 2021) gerapporteerd zijn op basis van IPCC Tier 1 standaard waarden ($5,13$ kg/jaar per dier, waarvan 5 kg/jaar per dier enterisch). Zoals hierboven aangegeven is in Aarnink et al. (2014) de CO₂-productie uit de pot niet gemeten, waardoor het ventilatiedebiet (en daardoor de gerapporteerde methaanemissie) een onderschatting was van de werkelijke waarden (zie Tabel 4: gemiddeld over de twee bemeten bedrijven is de bijdrage uit de pot 50% van de CO₂-productie uit de dieren).

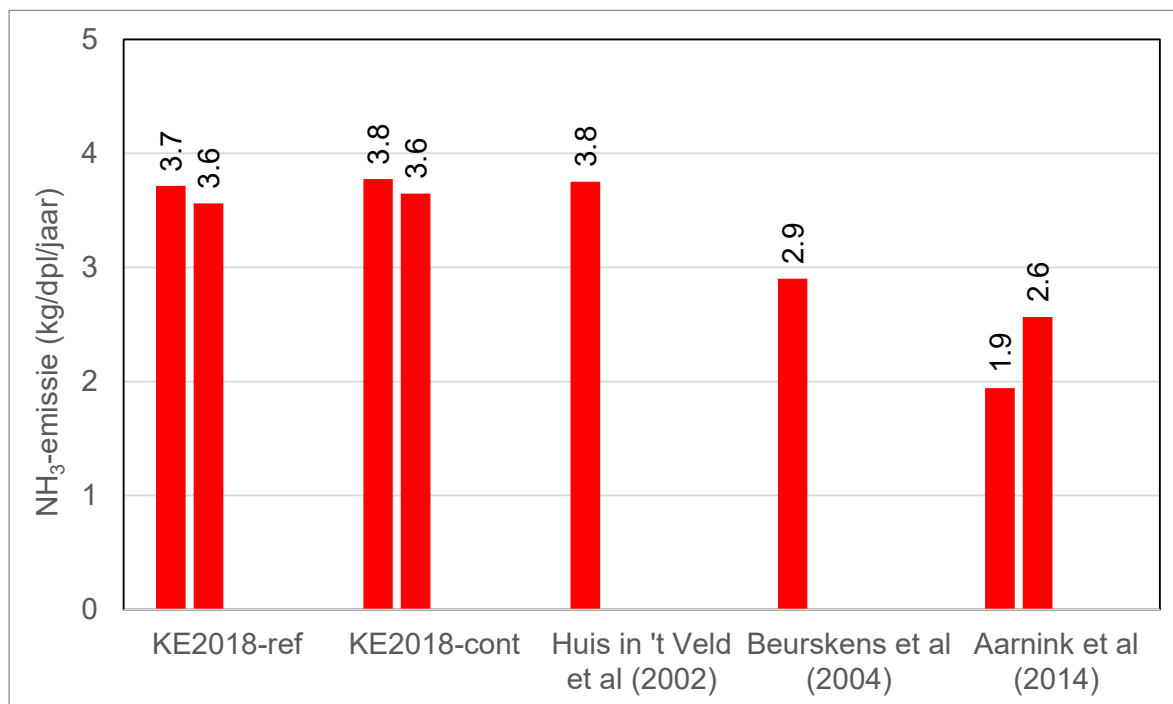


Figuur 3.4 CH₄-emissie voor de gemeten afdelingen in dit onderzoek tijdens de referentiemetingen (KE2018-ref) en de continue metingen (KE2018-cont). In de figuur worden ook de waarden weergegeven die in eerdere onderzoeksrapporten zijn gerapporteerd.

In Figuur 3.5 en Tabel 5 worden de gemiddelde NH₃-emissies voor zowel de continue als de referentiemetingen voor de gemeten afdelingen weergegeven. Op basis van de continue metingen werd voor G1 een gemiddelde ammoniakemissie (\pm standaarddeviatie tussen metingen) berekend van $3,8 \pm 1,3$ kg/jaar per dierplaats. Op basis van de referentiemetingen was de gemiddelde ammoniakemissie $3,7 \pm 1,4$ kg/jaar per dierplaats. Bij G2 was dat $3,6 \pm 1,0$ en $3,6 \pm 1,1$ kg/jaar per dierplaats voor respectievelijk de continue- en referentiemetingen. Bij de bepaling van deze emissies is geen leegstand verrekend (Groenestein en Aarnink, 2008).

Ook voor ammoniak waren de verschillen tussen de emissies die bepaald zijn met continue metingen, en met referentiemetingen niet significant. Er zijn ook geen significante verschillen tussen bedrijven G1 en G2 gevonden. Op basis van de continue metingen was de variatiecoëfficiënt tussen bedrijven <5%, en de variatiecoëfficiënt binnen bedrijven 33%. De gemiddelde ammoniakemissie bij G1 en G2 is vergelijkbaar met de gemiddelde emissie (gemiddelde \pm standaarddeviatie tussen bedrijven: $3,8 \pm 2,3$ kg/jaar per dierplaats) gerapporteerd in Huis in 't Veld et al. (2002) bij continue metingen aan één natuurlijk geventileerde geitenstal gedurende twee perioden (93 dagen in de zomer; 147 dagen in de winter). De ammoniakemissie is iets hoger dan de emissie gerapporteerd in Beurskens et al. (2004) bij metingen (10 referentiemetingen) in het najaar (oktober-december) bij een natuurlijk geventileerde geitenstal. Dat de metingen in Beurskens et al. (2004) alleen in het najaar zijn

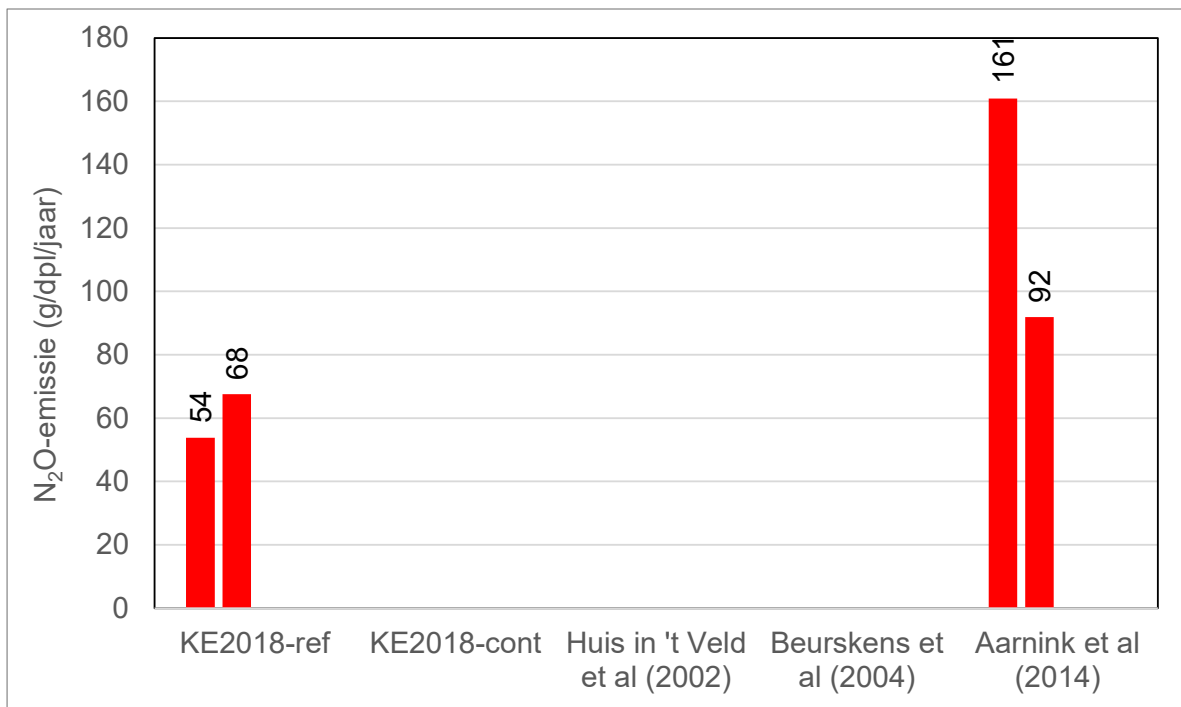
uitgevoerd, met lagere buitentemperaturen, zou kunnen verklaren waarom de emissies lager uitvallen ten opzichte van metingen op jaarbasis. De ammoniakemissie in onderhavige studie is ook hoger dan de gemiddelde emissie (gemiddelde \pm standaarddeviatie tussen bedrijven) gerapporteerd in Aarnink et al. (2014) bij metingen aan twee natuurlijk geventileerde geitenstallen ($2,3 \pm 0,4$ kg/jaar per dierplaats). Hier is aan te merken dat, zoals eerder aangegeven, in Aarnink et al. (2014) de CO₂-productie uit de pot niet is gemeten, waardoor het ventilatiedebiet (en daardoor de gerapporteerde ammoniakemissie) een onderschatting was van de werkelijke waarden (zie Tabel 4: gemiddeld over de twee bemeten bedrijven is de bijdrage uit de pot 50% van de CO₂-productie uit de dieren). De gemiddelde ammoniakemissie bij G1 en G2 is hoger dan de huidige Rav-emissiefactor (1,9 kg/jaar per dierplaats) voor overige huisvestingssystemen voor geiten ouder dan 1 jaar.



Figuur 3.5 NH₃-emissie voor de gemeten afdelingen in dit onderzoek tijdens de referentiemetingen (KE2018-ref) en de continue metingen (KE2018-cont). In de figuur worden ook de waarden weergegeven die in eerdere onderzoeksrapporten zijn gerapporteerd.

In Figuur 3.6 en Tabel 5 worden de gemiddelde N₂O-emissies voor de referentiemetingen voor de gemeten afdelingen weergegeven. Op basis van de referentiemetingen werd voor G1 een gemiddelde lachgasemissie (\pm standaarddeviatie tussen metingen) berekend van 54 ± 55 g/jaar per dierplaats. Op basis van de referentiemetingen werd voor G2 een gemiddelde lachgasemissie (\pm standaarddeviatie tussen metingen) berekend van 68 ± 68 g/jaar per dierplaats. Voor lachgas zijn geen continue metingen uitgevoerd. Bij de bepaling van deze emissies is geen leegstand verrekend (Groenestein en Aarnink, 2008).

Er zijn geen significante verschillen tussen bedrijven gevonden. Opvallend is dat, ondanks de onderschatting van het ventilatiedebiet door Aarnink et al. (2014), de lachgasemissie (126 ± 49 g/jaar per dierplaats) in Aarnink et al. (2014) hoger is dan de emissies in onderhavige studie.



Figuur 3.6 N₂O-emissie voor de gemeten afdelingen in dit onderzoek tijdens de referentiemetingen (KE2018-ref). Er zijn voor lachgas geen continue metingen (KE2018-cont) uitgevoerd. In de figuur worden ook de waarden weergegeven die in eerdere onderzoeksrapporten zijn gerapporteerd.

4 Conclusies

In dit rapport worden de resultaten gerapporteerd van praktijkmetingen die in twee natuurlijk geventileerde geitenstallen in de periode oktober 2018 – oktober 2020 zijn uitgevoerd. Hieronder worden de belangrijkste conclusies op basis van de voorgestelde doelen weergegeven:

De methaanemissie uit geitenstallen vast te stellen

- De gemiddelde waarden van het ventilatie-debiet en de emissies van CH₄, NH₃ en N₂O (+/- standaarddeviatie tussen bedrijven; geen leegstand verrekend) is, voor de continue en de referentiemetingen:

| Kenmerk | Continue metingen | Referentiemetingen |
|---|-------------------|--------------------|
| Aantal bedrijven | 2 | 2 |
| Ventilatie-debiet (m ³ /uur/dier) | 146 ± 8 | 180 ± 15 |
| CH ₄ -emissie (kg/jaar per dierplaats) | 26,0 ± 1,8 | 27,7 ± 0,4 |
| NH ₃ -emissie (kg/jaar per dierplaats) | 3,7 ± 0,1 | 3,6 ± 0 1 |
| N ₂ O-emissie (g/jaar per dierplaats) | --- | 61 ± 10 |

- De pot levert een grote bijdrage aan de totale CO₂-productie in de stal. De CO₂-productie uit de pot is, gemiddeld over de twee gemeten stallen, 50% van de CO₂-productie van de dieren. Er lijkt een relatie te zijn tussen de potdiepte en de CO₂-productie uit de pot (hoe groter de potdiepte, hoe hoger de CO₂-productie). Dit heeft echter geen effect op de CH₄- en NH₃-emissies.

Demonstratie van directe bedrijfsmonitoring van emissies van methaan en ammoniak en demonstratie van de wijze waarop dit kan bijdragen aan het terugdringen van de methaanemissie via bedrijfsspecifieke maatregelen

- Er zijn geen significante verschillen gevonden tussen de gemiddelde bedrijfsemisies die bepaald zijn door middel van continue metingen, en op basis van de referentiemetingen.
- Bedrijfsmonitoring zou ingezet kunnen worden om het effect van emissiereductie maatregelen inzichtelijk te maken, mits de apparatuur voldoende gecontroleerd is (door middel van referentiemetingen). Waarborging blijft nog een aandachtspunt.

Literatuur

- Aarnink, A.J.A., H.I.J. Roest, J.W.H. Huis in 't Veld, M.C. van der Hulst, J.M.G. Hol, J. Mosquera en N.W.M. Ogink. 2014. Emissies van stof en ziektekiemen uit melkgeitenstallen; aanvullende metingen. Wageningen Livestock Research Rapport 712.
- Beurskens, A.G.C., P. de Gijssel en J.M.G. Hol. 2004. Geuremissie van een stal voor melkgeiten. Agrotechnology & Food Innovations Rapport 095.
- Groenestein, C.M. en A. J. A. Aarnink. 2008. Notitie over leegstand ten behoeve van het berekenen van een emissiefactor van een stal. Intern rapport 200808, Animal Science Group van Wageningen UR.
- Groenestein, C.M., J. Mosquera en R.W. Melse. 2016. Methaanemissie uit mest. Schatters voor biochemisch methaan potentieel (BMP) en methaanconversiefactor (MCF). Wageningen Livestock Research Rapport 961.
- Huis in 't Veld, J.W.H., E. Evers en G. Mol. 2002. Onderzoek naar de ammoniak- en geuremissie van stallen LVII. Natuurlijk geventileerd potstal oor melkgeiten. IMAG Rapport 2002-18.
- Lagerwerf, L.A., A. Bannink, C. van Bruggen, C.M. Groenestein, J.F.M. Huijsmans, J.W.H. van der Kolk, H.H. Luesink, S.M. van der Sluis, G.L. Velthof en J. Vonk. 2019. Methodology for estimating emissions from agriculture in the Netherlands. Calculations of CH₄, NH₃, N₂O, NO_x, NMVOC, PM₁₀, PM_{2.5} and CO₂ with the National Emission Model for Agriculture (NEMA) – update 2019. Wageningen, The Statutory Research Tasks Unit for Nature and the Environment. WOT-technical report 148. 215 p.
- Mosquera, J., J.P.M. Ploegaert, en G.C.C. Kupers. 2019. Determination of ammonia concentrations in air from livestock housing systems. Reference method using gas washing as applied by Wageningen Livestock Research. Wageningen Livestock Research Rapport 1187.
- Mosquera, J., J.P.M. Ploegaert, en G.C.C. Kupers. 2020. Determination of carbon dioxide concentrations in air from livestock housing systems. Reference method using the lung method as applied by Wageningen Livestock Research. Wageningen Livestock Research Rapport 1284.
- Ogink, N.W.M., J. Mosquera, J.M.G. Hol. 2017. Protocol voor meting van ammoniakemissie uit huisvestingssystemen in de veehouderij 2013a. Wageningen Livestock Research, WLR Rapport 1032.
- Ruysenaars, P.G., P.W.H.G. Coenen, J.D. Rienstra, P.J. Zijlema, E.J.M.M. Arets, K. Baas, R. Dröge, G. Geilenkirchen, M. 't Hoen, E. Honig, B. van Huet, E.P. van Huis, W.W.R. Koch, R.M. te Molder, J.A. Montfoort, t. van der Zee, M.C. van Zanten. 2021. Greenhouse gas emissions in the Netherlands 1990–2019. National Inventory Report 2021. RIVM Report-2021-0007.
- Van Bruggen, C., A. Bannink, C.M. Groenestein, J.F.M. Huijsmans, L.A. Lagerwerf, H.H. Luesink, G.L. Velthof & J. Vonk (2020). Emissies naar lucht uit de landbouw, 1990-2018. Berekeningen met het model NEMA. Wageningen, WOT Natuur & Milieu, WOT-technical report 178. 224 p.
- VERA, (2018), Vera-Testprotocol for Livestock Housing and Management Systems, Version 3:2018-09. Verification of Environmental Technologies for Agricultural Production. (https://www.vera-verification.eu/app/uploads/sites/9/2019/05/VERA_Testprotocol_Housing_v3_2018.pdf).

Bijlage 1 Resultaten per locatie

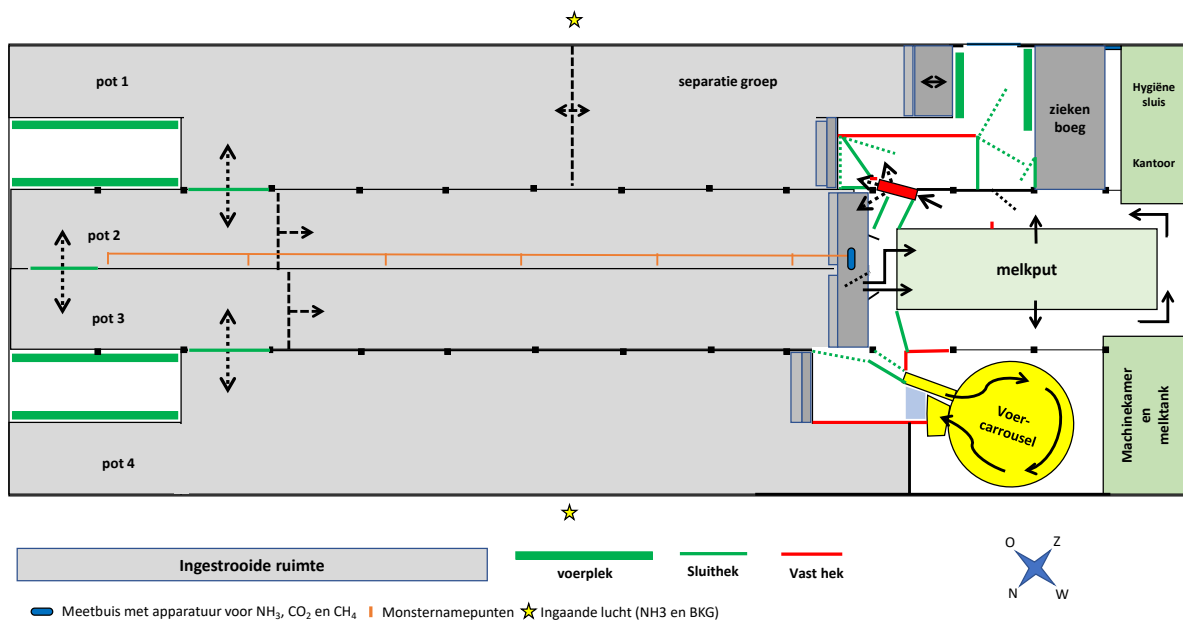
Bedrijf 1 (G1)

Huisvesting en bedrijfsvoering

De metingen vonden plaats in een melkgeitenbedrijf voor 900 geiten. Er zijn vier aparte potten (ophoping van stro en mest) in deze stal (Figuur G1.1) beschikbaar, waarbinnen en waartussen dieren zich vrij kunnen bewegen. Voor het dagelijks gebruik is 1,3 m² per dier pot beschikbaar. De melkgeiten verbleven gedurende bijna de gehele dag in deze ruimte, alleen tijdens het melken werden de dieren in de wachtruimte (pot 3) gebracht. De dieren werden in een melkput gemolken. Dagelijks werd circa 600 kg tarwestro in de potten ingestrooid. Dit is gedaan door een aantal stobalen verdeeld in plakken in de stal (potten) te leggen, die door de dieren zelf verspreid worden. Deze stobalen werden gedurende de zomermaanden met bokashi gespreoid. De potten werden elke 2-3 maanden (deels) leeggehaald.

De stal wordt natuurlijk geventileerd met handmatig bediende ventilatiegordijnen (in de zomer open, in de winter grotendeels (circa 2/3) dicht). De hoogte van de ventilatieopeningen is aan beide zijden van de stal 1,7m. Daarmee is het regelbare ventilatieoppervlak 0,227 m² per dier. In het midden van de stal is op het dak over de gehele lengte een open nok geplaatst (26 m breed). Het dak van de stal is niet geïsoleerd.

Het rantsoen voor zowel de melkgeiten als de opfoklammeren bestond uit zowel ruwvoer (vers gras/graskuil) als krachtvoer (in een verhouding van (gemiddeld) ongeveer 1/3 ruwvoer en 2/3 krachtvoer). Ruwvoer werd bij de aangewezen voerplekken (geen voergang; Figuur G1.1) in de stal gegeven. Het krachtvoer werd in een voer-carroussel vóór in de stal (naast de melkput; Figuur G1.1) verstrekt. In Tabel G1.1 zijn de belangrijkste kenmerken van dit bedrijf op een rij gezet.



Figuur G1.1 Stalindeling, inclusief oriëntatie van de stal en positie meetapparatuur.

Tabel G1.1 Belangrijkste kenmerken van de onderzochte geitenstal.

| Kenmerken | Waarde |
|---|--|
| Aantal dierplaatsen | 900 |
| Oriëntatie van de stal | Zuidwest-noordoost |
| Afmetingen stal | |
| Lengte [m] x Breedte [m] | 65 x 26 (buitenmaten) |
| Goot- en nokhoogte [m] | Goothoogte: 3 m Nokhoogte: 9 m |
| Inhoud [m ³ /dier] | 9,2 |
| Leefruimte | |
| Pot (aantal ruimtes) | 4 |
| Loopoppervlak (pot; m ² per dier) | 1,3 |
| Oppervlakte wachtruimte (m ² per dier) | --- |
| Pot bijstrooien (frequentie en hoeveelheid) | Dagelijks circa 600 kg tarwestro ingestrooid |
| Pot uitmesten (frequentie) | Om de 2-3 maanden wordt een deel van de potruimtes uitgemest |
| Ventilatie | |
| Beschrijving | Natuurlijk geventileerd, met ventilatieopeningen [1,7 m hoog] aan beide zijden van de stal |
| Ventilatieoppervlak [m ² /dierplaats] | 0,227 |
| Melken | |
| Melktijden 's ochtends | 7.30 – 11.00 |
| 's avonds | 19.30 – 23.00 |
| ¹ Melkgift [kg/dier/dag] | 3,1 |
| ¹ Vet [%] | 4,1 |
| ¹ Eiwit [%] | 3,5 |
| ¹ Uremgehalte [mg/100g] | 29,6 |
| ¹ Rantsoen | |
| Melkgeiten Voeropname (kg ds/dier/dag) | 2,7 |
| Aandeel gras/kuilgras (%) | 31 |
| Opfoklammeren Voeropname (kg ds/dier/dag) | 2,4 |
| Aandeel gras/kuilgras (%) | 36 |

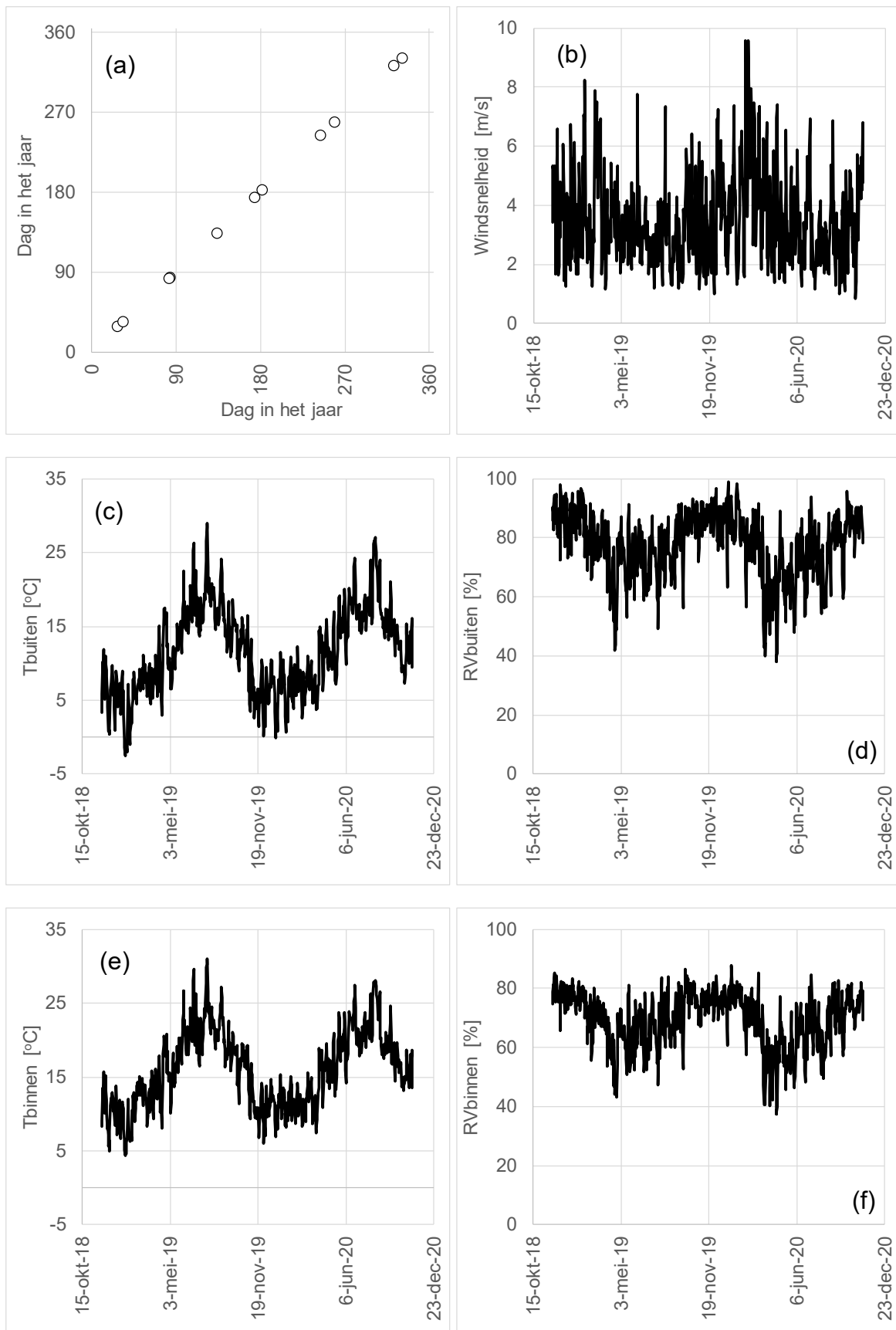
¹ Jaargemiddelden (2019-2020)

Resultaten

De gerapporteerde resultaten hebben betrekking op metingen die in de periode 27/11/2018 – 03/11/2020 zijn uitgevoerd. In deze periode zijn er elf referentiemetingen uitgevoerd, verdeeld over de verschillende seizoenen (Figuur G1.2a). Tijdens de referentiemetingen waren de gemiddelde buitentemperatuur (T: 9,8 °C; Tabel G1.2) en relatieve luchtvochtigheid (RV: 73%; Tabel G1.2) lager, en de windsnelheid (WS: 3,4 m/s) vergelijkbaar met de langdurige 10-jaargemiddelden (2009–2018) bij het dichtstbijzijnde KNMI-weerstation (De Bilt; T: 10,6 °C; RV: 80%; WS: 3,4 m/s). Voor de continue metingen was de gemiddelde buitentemperatuur (T: 11,6 °C; Tabel G1.2) hoger dan de langdurige 10-jaargemiddelde, de relatieve luchtvochtigheid en windsnelheid waren vergelijkbaar. In Figuur G1.2 worden de continue metingen voor een aantal klimaatparameters (gemeten binnentemperatuur en -luchtvochtigheid; buitentemperatuur, relatieve luchtvochtigheid buiten, windsnelheid bij het dichtstbijzijnde KNMI-meteostation) grafisch weergegeven. In Tabel G1.3 worden de uitmest-momenten, potruimte en hoeveelheid uitgehaalde mest (pot) weergegeven. De data waarop referentiemetingen zijn uitgevoerd, en gemiddelde klimaat- en managementgegevens en meetresultaten tijdens de referentiemetingen, worden in Tabel G1.4 en Tabel G1.5 samengevat.

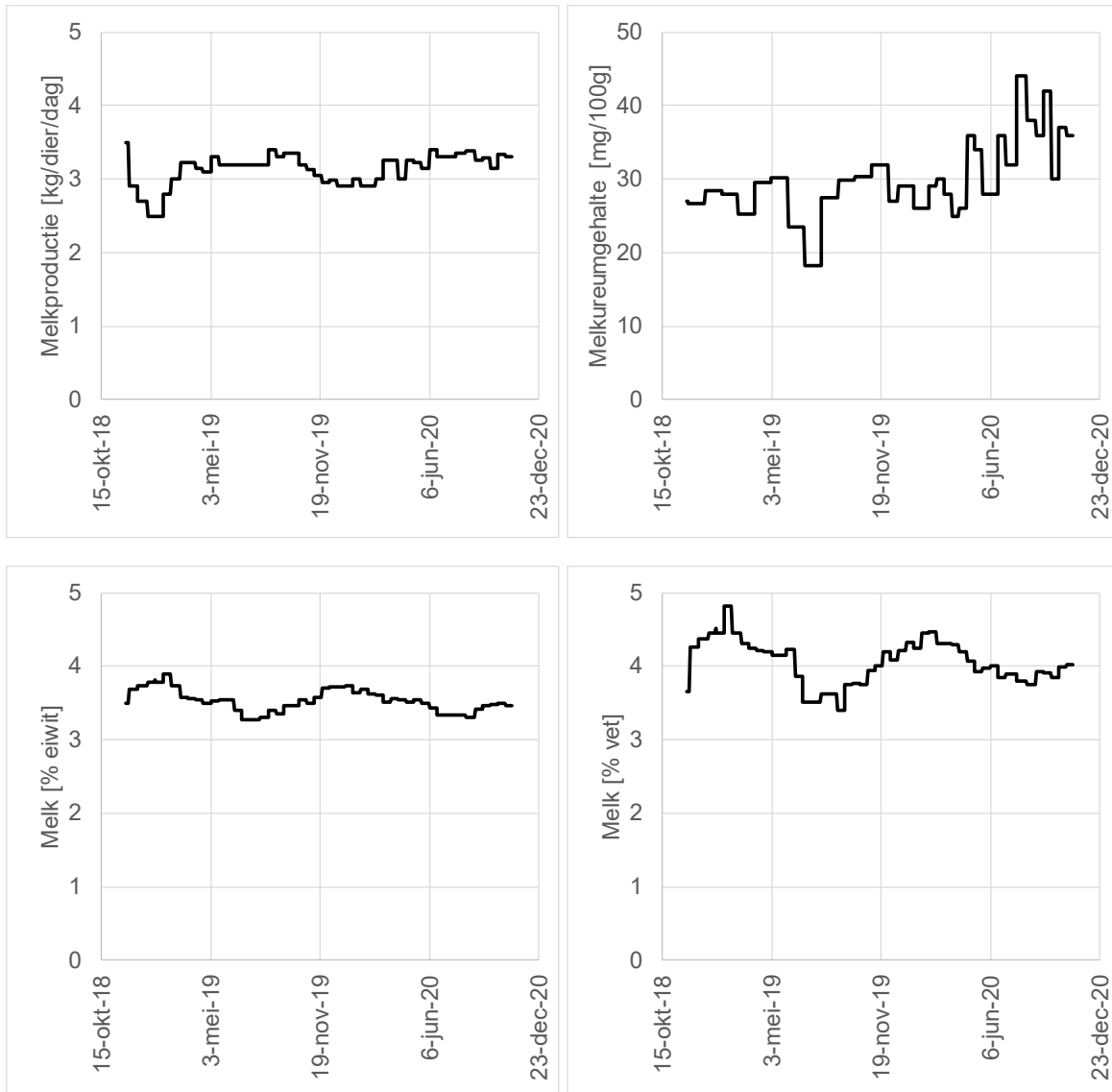
Tabel G1.2 Gemiddelde waarden (tussen haakjes minimum en maximum waarden) van een aantal management- en klimaatparameters en meetresultaten voor zowel continue- als referentiemetingen.

| | Kenmerk | Continue | Referentie |
|--|--|--------------------|--------------------|
| Management | Bezettingsgraad | 104 (90 : 118) | 103 (90 : 116) |
| | Melkgevende geiten | 887 (791 : 970) | 891 (791 : 960) |
| | Bokken | 2 (0 : 9) | 1 (0 : 9) |
| | Opfokklammeren | 61 (0 : 195) | 37 (0 : 170) |
| | Melkproductie [kg/dier/dag] | 3,1 (2,5 : 3,5) | 3,2 (2,5 : 3,5) |
| | Melk [% eiwit] | 3,5 (3,3 : 3,9) | 3,5 (3,3 : 3,8) |
| | Melk [% vet] | 4,1 (3,4 : 4,8) | 4,0 (3,5 : 4,5) |
| | Ureumgehalte [mg/100g] | 29,6 (18,2 : 44,0) | 28,8 (18,2 : 36,0) |
| Klimaat | T-binnen [°C] | 16,0 (4,4 : 31,0) | 14,0 (7,5 : 23,4) |
| | RV-binnen [%] | 69 (38 : 88) | 66 (41 : 78) |
| | T-buiten [°C] | 11,6 (-2,5 : 29,0) | 9,8 (2,8 : 18,7) |
| | RV-buiten [%] | 77 (38 : 99) | 73 (43 : 88) |
| | Windrichting | 193 (26 : 345) | 219 (55 : 309) |
| | Windsnelheid op 10 m hoogte [m/s] | 3,5 (0,8 : 9,6) | 3,4 (1,9 : 5,2) |
| Resultaten | Aantal meetdagen | 707 | 11 |
| | Ventilatie-debiet [m ³ /uur/dier] | 152 (58 : 427) | 169 (107 : 278) |
| | CO ₂ -productie uit de pot [g CO ₂ /m ² /uur] | 23,8 (19,1 : 27,5) | 22,3 (19,1 : 27,5) |
| | CO ₂ stal [ppm] | 829 (549 : 1302) | 814 (660 : 960) |
| | CO ₂ ingaand [ppm] | 447 (395 : 650) | 478 (431 : 543) |
| | Aantal meetdagen | 707 | 11 |
| | NH ₃ stal [ppm] | 4,5 (0,9 : 8,8) | 4,2 (2,0 : 7,8) |
| | NH ₃ ingaand [ppm] | --- | 0,43 (0,13 : 0,86) |
| | NH ₃ -emissie [kg/jaar per dpl] | 3,8 (1,3 : 8,8) | 3,7 (1,6 : 6,7) |
| | Aantal meetdagen | 645 | 11 |
| | CH ₄ stal [ppm] | 34,8 (12,9 : 67,6) | 32,6 (17,4 : 50,4) |
| | CH ₄ ingaand [ppm] | --- | 3,7 (2,2 : 6,9) |
| | CH ₄ -emissie [kg/jaar per dpl] | 27 (15 : 56) | 28 (19 : 38) |
| | Aantal meetdagen | --- | 11 |
| | N ₂ O stal [ppm] | --- | 0,36 (0,28 : 0,48) |
| | N ₂ O ingaand [ppm] | --- | 0,35 (0,28 : 0,46) |
| N ₂ O-emissie [kg/jaar per dpl] | --- | 0,05 (0,01 : 0,19) | |



Figuur G1.2 a) Verdeling van de metingen over de seizoenen; b) t/m f) Continue metingen van een aantal klimaatparameters.

In Figuur G1.3 worden de bepalingen (op 2-weken tot maandbasis) van de melkproductie en -samenstelling (melkureum, % eiwit, %vet) grafisch weergegeven. De melkproductie varieerde tussen 2,5 en 3,5 kg/dier/dag (gemiddeld 3,1 kg/dier/dag), en het ureumgehalte in melk tussen 18 en 44 mg/100g (gemiddeld 30 mg/100g). De melk had gemiddeld 3,5% eiwit (tussen 3,3 en 3,9) en 4,1% vet (tussen 3,4 en 4,8).

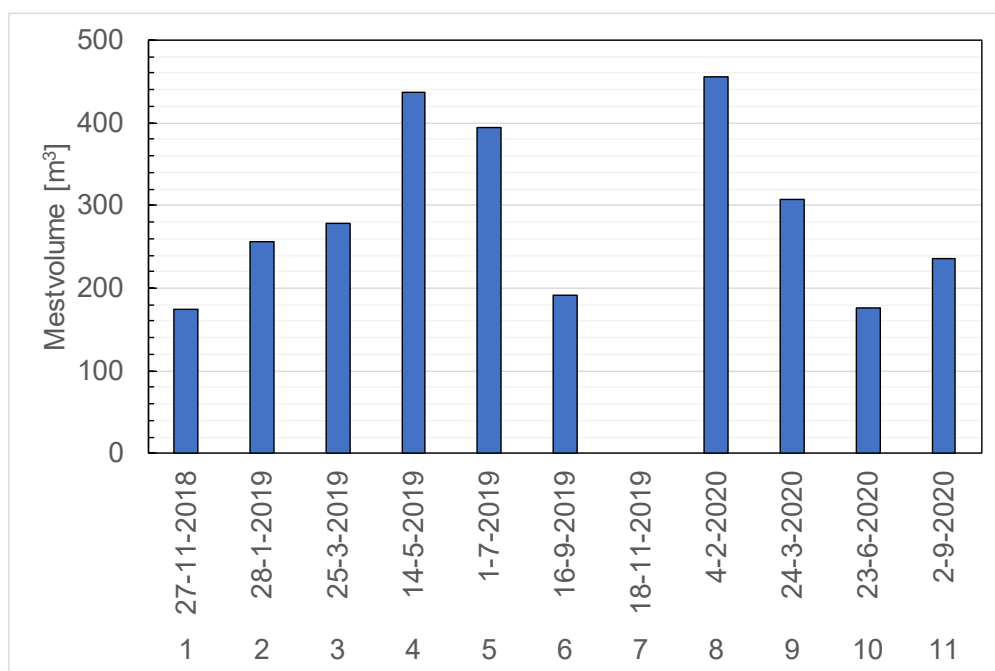


Figuur G1.3 Melkproductie en -samenstelling (2-weken basis) over de gehele meetperiode.

In Tabel G1.3 worden de uitmest-momenten, potruimte en hoeveelheid uitgehaalde mest (pot) weergegeven. In Figuur G1.4 wordt de geschatte potvolume (op basis van hoogtemetingen op minimaal 16 plekken in de stal verdeeld over de vier potruimtes) grafisch weergegeven.

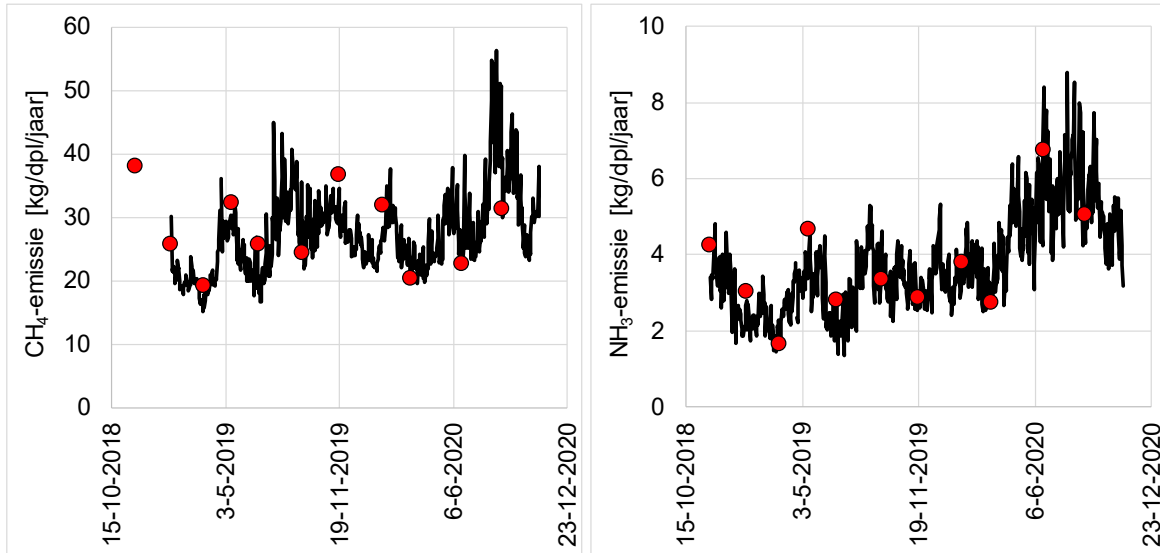
Tabel G1.3 Uitmest-momenten, potruimte en hoeveelheid uitgehaalde mest (pot).

| Datum uitmesten | Potruimte | Hoeveelheid [m3] |
|------------------|------------------|------------------|
| 28-9-2018 | Pot 2 +1/2 pot 1 | 120 |
| 14-11-2018 | 4 | 120 |
| 21-12-2018 | 3 | 100 |
| 15-3-2019 | 1 | 100 |
| 5-4-2019 | 2, 3, 4 | 400 |
| 2-9-2019 | 3 | 70 |
| 5-9-2019 | 2 | 70 |
| 6-9-2019 | 4 | 150 |
| 5-12-2019 | 2 | 25 |
| 24-12-2019 | 4 | 50 |
| 6-1-2020 | 4 | 50 |
| 18-2-2020 | 3 | 100 |
| 26 en 27 feb '20 | 2 | 80 |
| 26 en 27 feb '20 | 1 | 150 |
| 6-4-2020 | 4 | 100 |
| 7-4-2020 | 3 | 50 |
| 19-5-2020 | 3 | 50 |
| 21-5-2020 | 1 | 50 |
| 2-7-2020 | 3 | 50 |
| 9-7-2020 | 4 | 50 |
| 24-9-2020 | 4 | 80 |
| 25-9-2020 | 3 | 50 |



Figuur G1.4 Geschatte potvolume (m^3 ; op basis van hoogtemetingen op minimaal 16 punten verdeeld over de vier potruimtes) tijdens de referentiemetingen.

In Figuur G1.5 worden per dag de ammoniak- en methaanemissies weergegeven. Op basis van alle meetgegevens (continue metingen) werd een gemiddelde ammoniakemissie (\pm standaarddeviatie tussen metingen) berekend van $3,8 \pm 1,3$ kg/jaar per dierplaats. Op basis van de referentiemetingen was de gemiddelde ammoniakemissie $3,7 \pm 1,4$ kg/jaar per dierplaats. Op basis van alle meetgegevens (continue metingen) werd een gemiddelde methaanemissie (\pm standaarddeviatie tussen metingen) berekend van 27 ± 6 kg/jaar per dierplaats. Op basis van de referentiemetingen was de gemiddelde methaanemissie 28 ± 6 kg/jaar per dierplaats. Op basis van de referentiemetingen was de (voor leegstand gecorrigeerde) gemiddelde lachgasemissie 54 ± 55 g/jaar per dierplaats. Er zijn geen continue lachgasmetingen bij de geiten uitgevoerd. Voor geiten wordt geen leegstand verrekend (Groenestein en Aarnink, 2008).



Figuur G1.5 Links: CH_4 -emissie [kg/jaar per dierplaats]; Rechts: NH_3 -emissie [kg/jaar per dierplaats]. De referentiemetingen worden met rode cirkels weergegeven.

Tabel G1.4 Data waarop referentiemetingen zijn uitgevoerd, en gemiddelde klimaat- en managementgegevens tijdens de referentiemetingen.

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | |
|--------------------------------|--------------------------------------|-----------------|-----------|-----------|----------|-----------|------------|----------|-----------|-----------|-----------|-------|
| Datum | 27-11-2018 | 28-1-2019 | 25-3-2019 | 14-5-2019 | 1-7-2019 | 16-9-2019 | 18-11-2019 | 3-2-2020 | 23-3-2020 | 22-6-2020 | 31-8-2020 | |
| Dag in het jaar | 331 | 28 | 84 | 134 | 182 | 259 | 322 | 34 | 83 | 174 | 244 | |
| Klimaatgegevens | T-binnen [°C] | 8,7 | 7,5 | 10,2 | 16,3 | 21,1 | 16,9 | 10,1 | 11,5 | 10,0 | 23,4 | 18,7 |
| | RV-binnen [%] | 76,8 | 76,3 | 69,6 | 53,4 | 60,3 | 75,5 | 77,8 | 74,0 | 40,7 | 56,6 | 66,8 |
| | T-buiten [°C] | 4,6 | 2,8 | 7,5 | 11,4 | 17,7 | 12,7 | 5,7 | 7,3 | 4,9 | 18,7 | 14,1 |
| | RV-buiten [%] | 88,1 | 82,7 | 73,4 | 59,1 | 64,7 | 84,9 | 87,5 | 81,4 | 43,0 | 65,6 | 77,9 |
| | Windrichting | 145,4 | 246,9 | 308,5 | 55,0 | 280,4 | 224,1 | 273,2 | 266,5 | 123,8 | 189,0 | 293,2 |
| | Windsnelheid op 10 m hoogte [m/s] | 4,4 | 3,8 | 4,3 | 3,3 | 3,2 | 2,1 | 2,6 | 4,4 | 5,2 | 2,1 | 1,9 |
| | Managementgegevens | Bezettingsgraad | 90 | 103 | 99 | 116 | 106 | 101 | 103 | 109 | 102 | 107 |
| Melkgevende geiten | | 814 | 791 | 890 | 870 | 950 | 897 | 860 | 950 | 915 | 960 | 900 |
| Bokken | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Opfoklammeren | | 0 | 133 | 0 | 170 | 0 | 0 | 70 | 30 | 2 | 3 | 4 |
| Melkproductie [kg/dier/dag] | | 3,5 | 2,5 | 3,2 | 3,3 | 3,2 | 3,4 | 3,1 | 2,9 | 3,3 | 3,3 | 3,3 |
| Melk [% eiwit] | | 3,5 | 3,8 | 3,6 | 3,5 | 3,3 | 3,5 | 3,6 | 3,7 | 3,5 | 3,3 | 3,4 |
| Melk [% vet] | | 3,7 | 4,5 | 4,3 | 4,2 | 3,5 | 3,8 | 4,0 | 4,5 | 4,3 | 3,8 | 3,9 |
| Ureumgehalte [mg/100g] | | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 26 | 28 | 36 | 36 |

Tabel G1.5. Data waarop referentiemetingen zijn uitgevoerd en meetresultaten (ventilatie-debiet, concentraties en emissies) tijdens de referentiemetingen.

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|---|------------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|------------|----------|-----------|-----------|-----------|
| Datum | 27-11-2018 | 28-1-2019 | 25-3-2019 | 14-5-2019 | 1-7-2019 | 16-9-2019 | 18-11-2019 | 3-2-2020 | 23-3-2020 | 22-6-2020 | 31-8-2020 |
| Dag in het jaar | 331 | 28 | 84 | 134 | 182 | 259 | 322 | 34 | 83 | 174 | 244 |
| CO ₂ stal [ppm] | 712 | 940 | 679 | 833 | 660 | 836 | 746 | 818 | 866 | 901 | 960 |
| CO ₂ ingaand [ppm] | 512 | 477 | 431 | 464 | 476 | 471 | 448 | 477 | 442 | 543 | 518 |
| CO ₂ -productie uit de pot [g CO ₂ /m ² /uur] | 20,4 | 19,1 | 23,0 | 20,6 | 24,8 | 20,8 | 20,8 | 27,5 | 27,5 | 20,2 | 20,5 |
| Debiet [m ³ /dier/uur] | 278 | 107 | 221 | 129 | 276 | 138 | 173 | 160 | 135 | 131 | 112 |
| NH ₃ stal [ppm] | 2,7 | 4,4 | 2,0 | 5,3 | 2,1 | 4,6 | 3,1 | 3,7 | 3,2 | 7,8 | 7,5 |
| NH ₃ ingaand [ppm] | 0,13 | 0,15 | 0,83 | 0,44 | 0,57 | 0,86 | 0,64 | 0,30 | 0,17 | 0,19 | 0,48 |
| NH ₃ emissie [kg/dpl/jaar] | 4,2 | 3,0 | 1,6 | 4,7 | 2,8 | 3,3 | 2,9 | 3,8 | 2,7 | 6,7 | 5,0 |
| CH ₄ stal [ppm] | 27,9 | 40,7 | 17,4 | 39,2 | 18,6 | 35,9 | 37,1 | 34,1 | 26,9 | 29,9 | 50,4 |
| CH ₄ ingaand [ppm] | 3,4 | 2,2 | 3,1 | 3,9 | 3,8 | 6,9 | 3,7 | 4,2 | 3,1 | 2,7 | 3,9 |
| CH ₄ emissie [kg/dpl/jaar] | 38,0 | 25,8 | 19,2 | 32,2 | 25,6 | 24,3 | 36,6 | 31,8 | 20,3 | 22,6 | 31,3 |
| N ₂ O stal [ppm] | 0,42 | 0,31 | 0,35 | 0,32 | 0,35 | 0,32 | 0,42 | 0,32 | 0,28 | 0,48 | 0,40 |
| N ₂ O ingaand [ppm] | 0,39 | 0,30 | 0,31 | 0,31 | 0,33 | 0,31 | 0,40 | 0,32 | 0,28 | 0,46 | 0,39 |
| N ₂ O emissie [kg/dpl/jaar] | 0,11 | 0,03 | 0,19 | 0,01 | 0,09 | 0,03 | 0,06 | 0,02 | 0,01 | 0,04 | 0,02 |

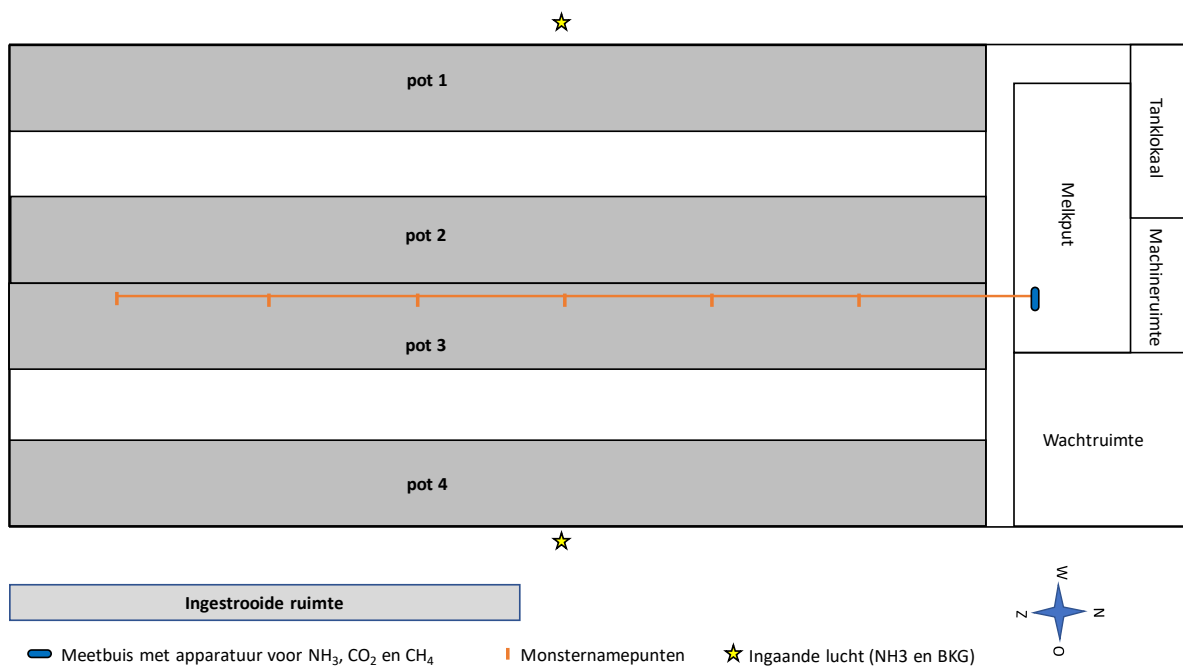
Bedrijf 2 (G2)

Huisvesting en bedrijfsvoering

De metingen vonden plaats in een melkgeitenbedrijf voor 900 geiten. Er zijn vier aparte potten (ophoping van stro en mest) in deze stal (Figuur G2.1) beschikbaar, waar dieren zich vrij kunnen bewegen. Per pot is aan één zijde een voergang. Voor het dagelijks gebruik is 1,27 m² per dier pot beschikbaar. De melkgeiten verbleven gedurende bijna de gehele dag in deze ruimte, alleen tijdens het melken werden de dieren per groep (per pot) in de wachtruimte gebracht. De dieren worden in een melkput gemolken. Dagelijks werd 1050 kg stro in de potten ingestrooid. De potten werden elke 2-3 maanden (deels) leeggehaald.

De stal wordt natuurlijk geventileerd met handmatig bediende ventilatiegordijnen. De hoogte van de ventilatieopeningen is aan beide zijden van de stal 1,25m. Daarmee is het regelbare ventilatieoppervlak 0,21 m² per dier. In het midden van de stal is op het dak over de gehele lengte een open nok geplaatst. De dak van de stal is volledig geïsoleerd.

Het rantsoen bestond uit brok (tussen 2,3 en 3,5 kg per dier) en onbeperkt stro/gras/hooi. Het voer werd bij de voergangen (Figuur G2.1) in de stal verstrekt (de dieren kunnen zelf naar behoefte pakken). In Tabel G2.1 zijn de belangrijkste kenmerken van dit bedrijf op een rij gezet.



Figuur G2.1 Stalindeling, inclusief oriëntatie van de stal en positie meetapparatuur.

Tabel G2.1 Belangrijkste kenmerken van de onderzochte geitenstal.

| Kenmerken | Waarde | |
|---|---|-----------|
| Aantal dierplaatsen | 900 | |
| Oriëntatie van de stal | noord-zuid | |
| Afmetingen stal | | |
| Lengte [m] x Breedte [m] | 75,6 x 27,4 | |
| Goot- en nokhoogte [m] | Goothoogte: 2,5 m Nokhoogte: 7,5 m | |
| Inhoud [m ³ /dier] | 15,75 | |
| Leefruimte | | |
| Pot (aantal ruimtes) | 4 | |
| Loopoppervlak (pot; m ² per dier) | 1,27 | |
| Oppervlakte wachtruimte (m ² per dier) | 0,4 | |
| Pot bijstrooien (frequentie en hoeveelheid) | Dagelijks circa 1050 kg stro ingestrooid | |
| Pot uitmesten (frequentie) | Om de 2-3 maanden wordt een deel van de potruimtes uitgemest | |
| Ventilatie | | |
| Beschrijving | Natuurlijk geventileerd, met ventilatieopeningen [1,25 m hoog] aan beide zijden van de stal | |
| Ventilatieoppervlak [m ² /dierplaats] | 0,21 | |
| Melken | | |
| Melktijden 's ochtends | 5:00 – 7:45 | |
| 's avonds | 16:00 – 18:30 | |
| ¹ Melkgift [kg/dier/dag] | 3,5 | |
| ¹ Vet [%] | 4,2 | |
| ¹ Eiwit [%] | 3,6 | |
| ¹ Uremgehalte [mg/100g] | 24,7 | |
| ¹ Rantsoen | | |
| Melkgeiten | Voeropname (kg ds/dier/dag) | Onbeperkt |
| | Brok (kg/dier/dag) | 3 |
| Opfoklammeren | Voeropname (kg ds/dier/dag) | Onbeperkt |
| | Aandeel gras/kuilgras (%) | Onbeperkt |

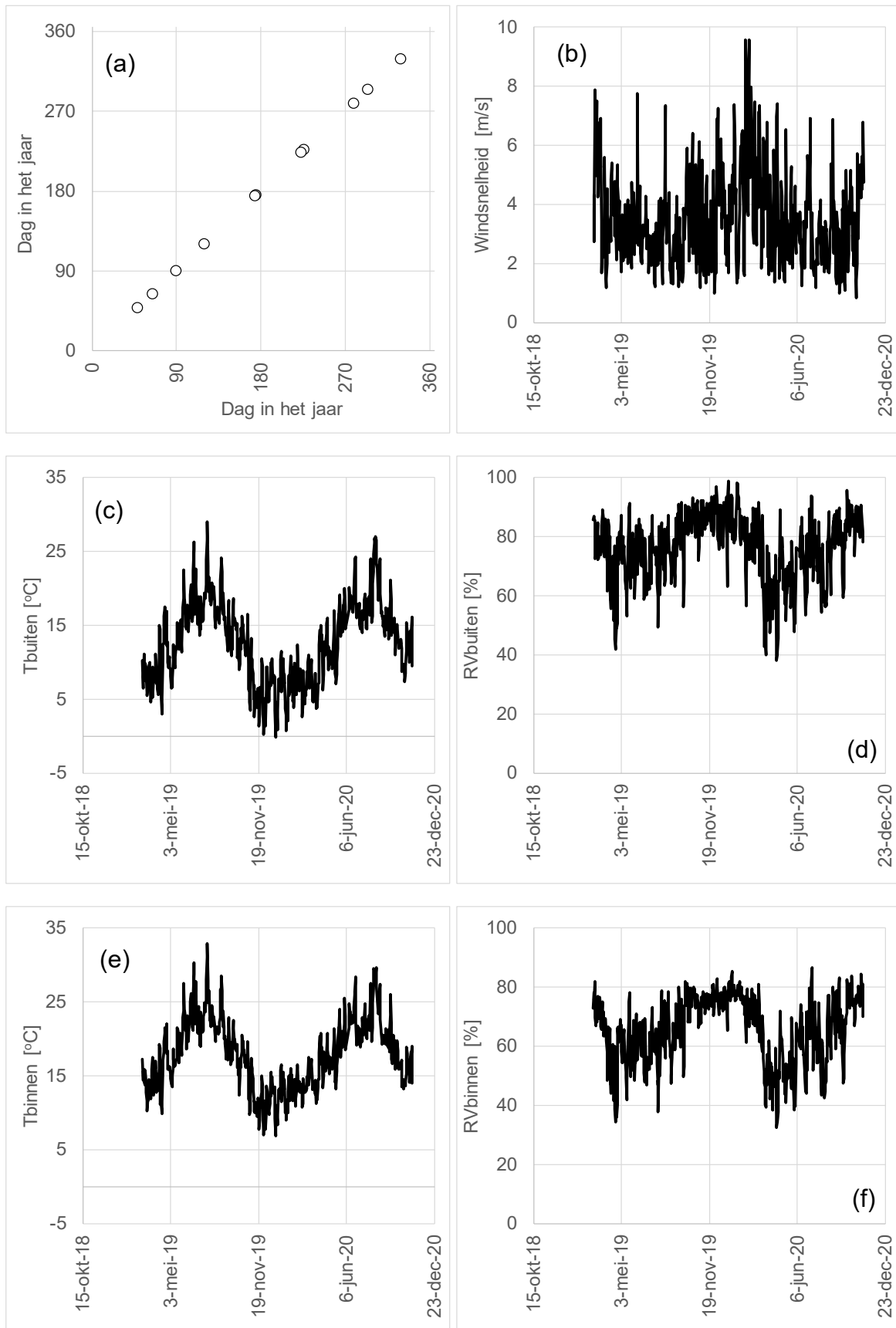
¹ Jaargemiddelden (2020)

Resultaten

De gerapporteerde resultaten hebben betrekking op metingen die in de periode 28/02/2019 – 03/11/2020 zijn uitgevoerd. In deze periode zijn er elf referentiemetingen uitgevoerd, verdeeld over de verschillende seizoenen (Figuur G2.2a). Tijdens de referentiemetingen was de gemiddelde buitentemperatuur (T: 14,3 °C; Tabel G1.2) hoger, de relatieve luchtvochtigheid (RV: 75%; Tabel G1.2) iets lager dan, en de windsnelheid (WS: 3,5 m/s) vergelijkbaar met de langdurige 10-jaargemiddelden (2009-2018) bij het dichtstbijzijnde KNMI-weerstation (De Bilt; T: 10,6 °C; RV: 80%; WS: 3,4 m/s). Voor de continue metingen was de gemiddelde buitentemperatuur (T: 12,5 °C; Tabel G2.2) hoger dan de langdurige 10-jaargemiddelde, de relatieve luchtvochtigheid was iets lager dan en de windsnelheid vergelijkbaar met de 10-jaargemiddelde. In Figuur G2.2 worden de continue metingen voor een aantal klimaatparameters (gemeten binnentemperatuur en -luchtvochtigheid; buitentemperatuur, relatieve luchtvochtigheid buiten, windsnelheid bij het dichtstbijzijnde KNMI-meteostation) grafisch weergegeven. In Tabel G2.3 worden de uitmest-momenten, potruimte en hoeveelheid uitgehaalde mest (pot) weergegeven. De data waarop referentiemetingen zijn uitgevoerd, en gemiddelde klimaat- en managementgegevens en meetresultaten tijdens de referentiemetingen, worden in Tabel G2.4 en Tabel G2.5 samengevat.

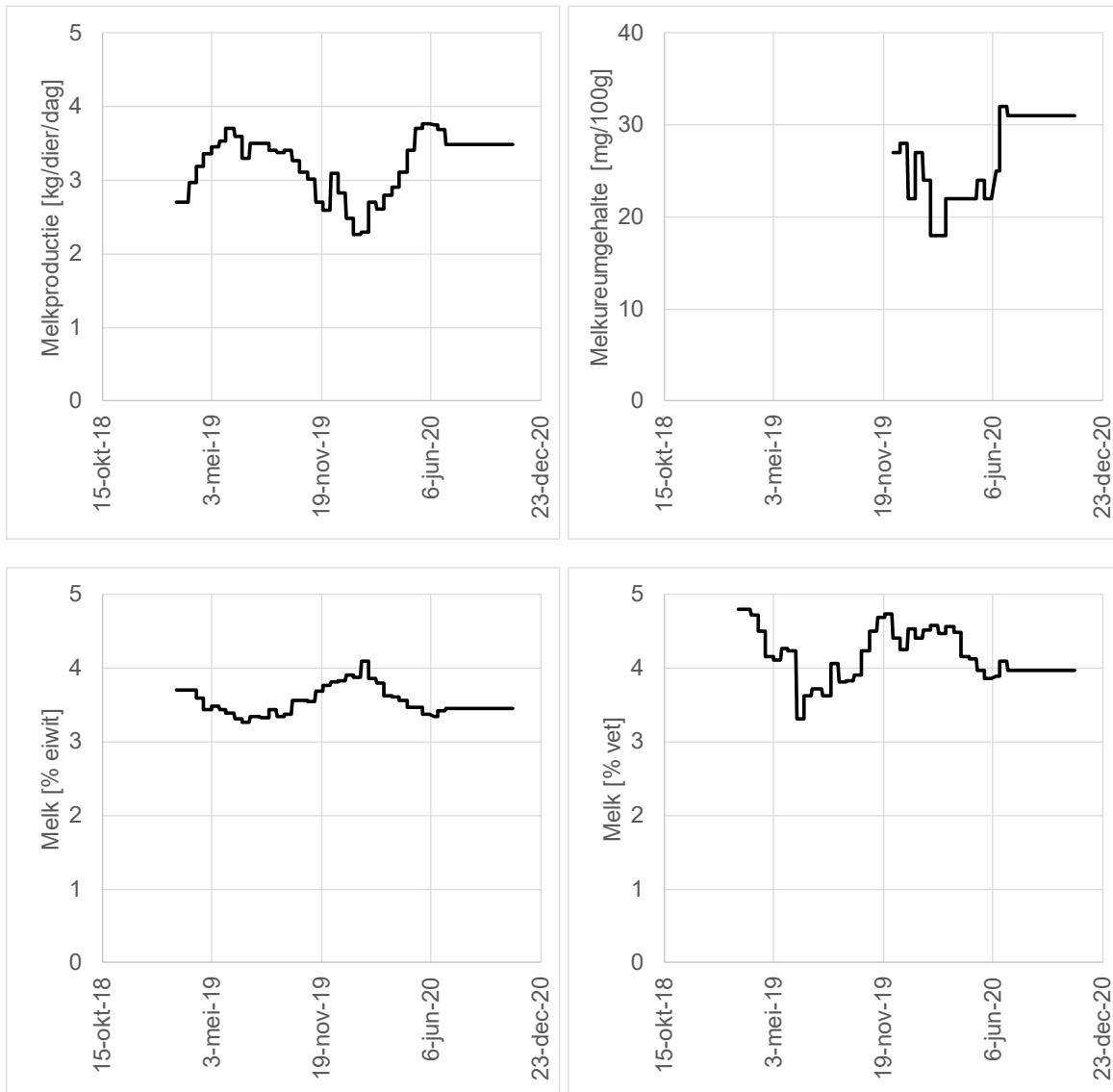
Tabel G2.2 Gemiddelde waarden (tussen haakjes minimum en maximum waarden) van een aantal management- en klimaatparameters en meetresultaten voor zowel continue- als referentiemetingen.

| | Kenmerk | Continue | Referentie |
|--|--|--------------------|---------------------|
| Management | Bezettingsgraad | 97 (87 : 105) | 97 (87 : 105) |
| | Melkgevende geiten | 873 (784 : 948) | 874 (784 : 948) |
| | Bokken | 1 (0 : 16) | 1 (0 : 15) |
| | Opfoklammeren | 0 (0 : 0) | 0 (0 : 0) |
| | Melkproductie [kg/dier/dag] | 3,2 (2,3 : 3,8) | 3,3 (2,6 : 3,8) |
| | Melk [% eiwit] | 3,5 (3,3 : 4,1) | 3,5 (3,3 : 3,9) |
| | Melk [% vet] | 4,2 (3,3 : 4,8) | 4,1 (3,3 : 4,8) |
| | Ureumgehalte [mg/100g] | 26 (18 : 32) | 25,4 (18,0 : 32,0) |
| Klimaat | T-binnen [°C] | 17,8 (6,9 : 32,9) | 19,3 (11,8 : 29,5) |
| | RV-binnen [%] | 65 (32 : 87) | 63 (48 : 80) |
| | T-buiten [°C] | 12,5 (-0,1 : 29,0) | 14,3 (4,0 : 26,5) |
| | RV-buiten [%] | 76 (38 : 99) | 75 (57 : 93) |
| | Windrichting | 191 (26 : 338) | 195 (90 : 308) |
| | Windsnelheid op 10 m hoogte [m/s] | 3,5 (0,8 : 9,6) | 3,5 (2,1 : 7,0) |
| Resultaten | Aantal meetdagen | 609 | 11 |
| | Ventilatie-debiet [m ³ /uur/dier] | 140 (40 : 816) | 185 (59 : 671) |
| | CO ₂ -productie uit de pot [g CO ₂ /m ² /uur] | 28,0 (21,1 : 36,1) | 28,3 (21,1 : 36,1) |
| | CO ₂ stal [ppm] | 974 (529 : 1717) | 940 (537 : 1401) |
| | CO ₂ ingaand [ppm] | 473 (422 : 574) | 495 (450 : 531) |
| | Aantal meetdagen | 609 | 11 |
| | NH ₃ stal [ppm] | 5,4 (0,6 : 13,0) | 5,0 (1,2 : 9,5) |
| | NH ₃ ingaand [ppm] | --- | 0,30 (0,06 : 0,51) |
| | NH ₃ -emissie [kg/jaar per dpl] | 3,6 (1,0 : 7,9) | 3,6 (1,9 : 5,3) |
| | Aantal meetdagen | 585 | 11 |
| | CH ₄ stal [ppm] | 43,2 (7,1 : 115,6) | 42,3 (10,7 : 109,2) |
| | CH ₄ ingaand [ppm] | --- | 4,5 (2,2 : 6,5) |
| | CH ₄ -emissie [kg/jaar per dpl] | 25 (12 : 51) | 27 (19 : 42) |
| | Aantal meetdagen | --- | 11 |
| | N ₂ O stal [ppm] | --- | 0,44 (0,28 : 0,65) |
| | N ₂ O ingaand [ppm] | --- | 0,40 (0,28 : 0,63) |
| N ₂ O-emissie [kg/jaar per dpl] | --- | 0,07 (0,01 : 0,35) | |



Figuur G2.2 a) Verdeling van de metingen over de seizoenen; b) t/m f) Continue metingen van een aantal klimaatparameters.

In Figuur G2.3 worden de bepalingen (op 2-weken tot maandbasis) van de melkproductie en -samenstelling (melkureum, % eiwit, %vet) grafisch weergegeven. De melkproductie varieerde tussen 2,3 en 3,8 kg/dier/dag (gemiddeld 3,2 kg/dier/dag), en het ureumgehalte in melk tussen 18 en 32 mg/100g (gemiddeld 26 mg/100g). De melk had gemiddeld 3,5% eiwit (tussen 3,3 en 4,1) en 4,2% vet (tussen 3,3 en 4,8).

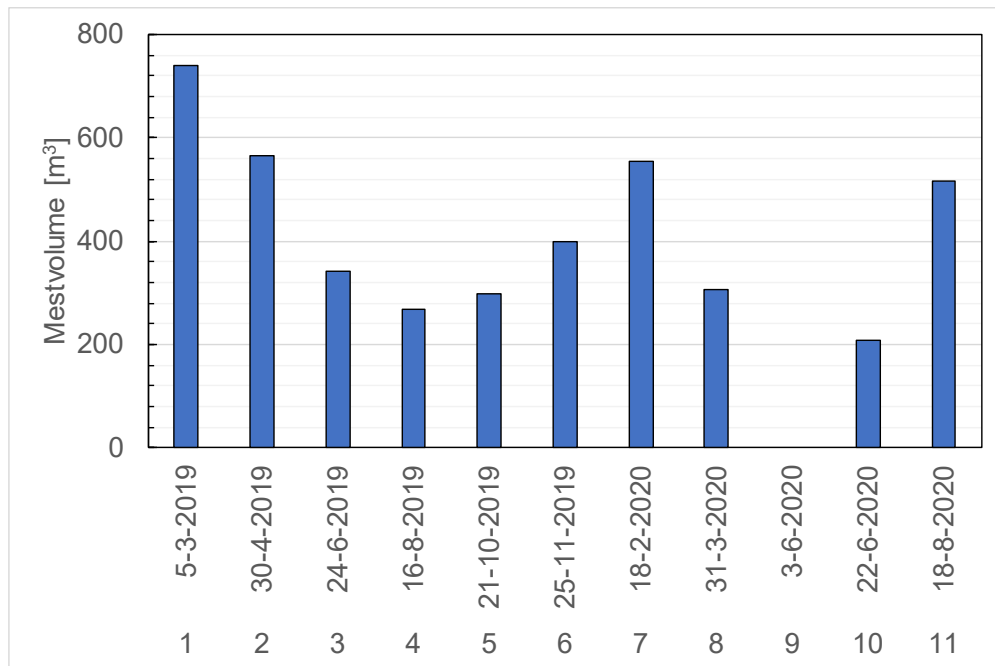


Figuur G2.3 Melkproductie en -samenstelling (2-weken basis) over de gehele meetperiode.

In Tabel G2.3 worden de uitmest-momenten, potruimte en hoeveelheid uitgehaalde mest (pot) weergegeven. In Figuur G2.4 wordt de geschatte potvolume (op basis van hoogtemetingen op minimaal 16 plekken in de stal verdeeld over de vier potruimtes) grafisch weergegeven.

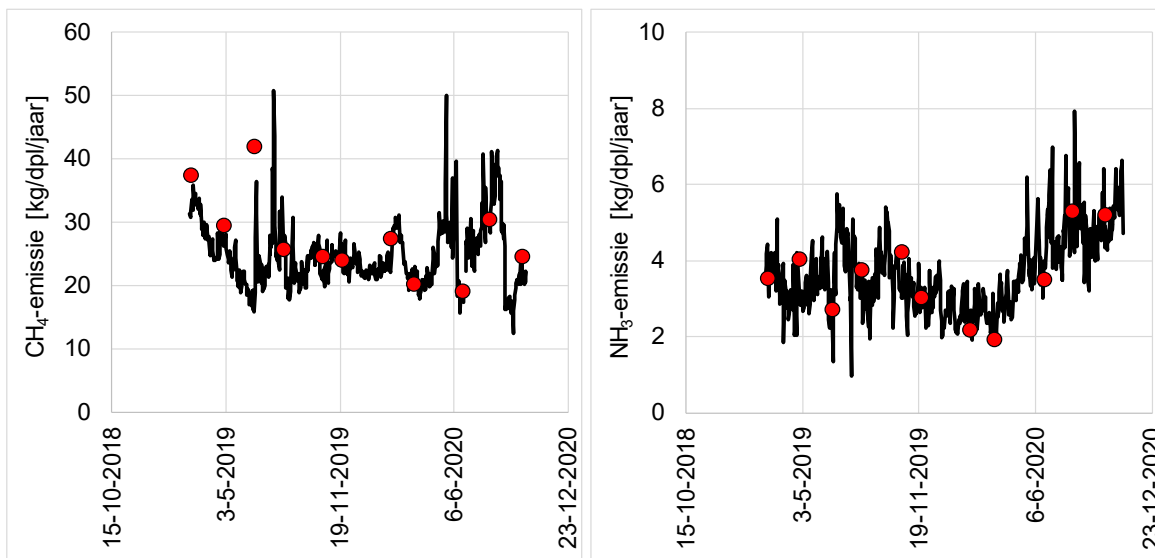
Tabel G2.3 *Uitmest-momenten, potruimte en hoeveelheid uitgehaalde mest (pot).*

| Datum uitmesten | Potruimte | Hoeveelheid [m ³] |
|-----------------|-----------|-------------------------------|
| 14-10-2019 | 1 | 130 |
| 26-11-2019 | 2 | 150 |
| 25-3-2020 | 2 | 150 |
| 22-5-2020 | 1 | 150 |
| 22-5-2020 | 2 | 150 |
| 29-5-2020 | 2 | 200 |
| 29-5-2020 | 3 | 200 |



Figuur G2.4 *Geschatte potvolume (m³; op basis van hoogtemetingen op minimaal 16 punten verdeeld over de vier potruimtes) tijdens de referentiemetingen.*

In Figuur G2.5 worden per dag de ammoniak- en methaanemissies weergegeven. Op basis van alle meetgegevens (continue metingen) werd een gemiddelde ammoniakemissie (\pm standaarddeviatie tussen metingen) berekend van $3,6 \pm 1,0$ kg/jaar per dierplaats. Op basis van de referentiemetingen was de gemiddelde ammoniakemissie $3,6 \pm 1,1$ kg/jaar per dierplaats. Op basis van alle meetgegevens (continue metingen) werd een gemiddelde methaanemissie (\pm standaarddeviatie tussen metingen) berekend van 25 ± 5 kg/jaar per dierplaats. Op basis van de referentiemetingen was de gemiddelde methaanemissie 27 ± 7 kg/jaar per dierplaats. Op basis van de referentiemetingen was de (voor leegstand gecorrigeerde) gemiddelde lachgasemissie 68 ± 68 g/jaar per dierplaats. Er zijn geen continue lachgasmetingen bij de geiten uitgevoerd. Voor geiten wordt geen leegstand verrekend (Groenestein en Aarnink, 2008).



Figuur G2.5. Links: CH₄-emissie [kg/jaar per dierplaats]; Rechts: NH₃-emissie [kg/jaar per dierplaats]. De referentiemetingen worden met rode cirkels weergegeven.

Tabel G2.4 Data waarop referentiemetingen zijn uitgevoerd, en gemiddelde klimaat- en managementgegevens tijdens de referentiemetingen.

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | |
|--------------------------------|--------------------------------------|-----------------|-----------|-----------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|
| Datum | 5-3-2019 | 30-4-2019 | 24-6-2019 | 14-8-2019 | 21-10-2019 | 25-11-2019 | 17-2-2020 | 30-3-2020 | 22-6-2020 | 10-8-2020 | 5-10-2020 | |
| Dag in het jaar | 64 | 120 | 175 | 226 | 294 | 329 | 48 | 90 | 174 | 223 | 279 | |
| Klimaatgegevens | T-binnen [°C] | 14,7 | 16,1 | 29,5 | 21,0 | 17,2 | 13,5 | 13,3 | 11,8 | 23,7 | 28,3 | 16,3 |
| | RV-binnen [%] | 70,6 | 65,5 | 49,9 | 68,5 | 76,8 | 79,6 | 67,8 | 54,3 | 51,3 | 51,9 | 78,8 |
| | T-buiten [°C] | 8,7 | 10,0 | 25,7 | 16,8 | 11,9 | 8,3 | 7,9 | 4,0 | 18,7 | 26,5 | 12,5 |
| | RV-buiten [%] | 77,5 | 80,6 | 62,7 | 78,7 | 90,5 | 92,6 | 72,6 | 69,7 | 65,6 | 57,0 | 86,6 |
| | Windrichting | 195,6 | 231,3 | 148,1 | 214,0 | 182,7 | 150,8 | 228,5 | 161,5 | 189,0 | 90,4 | 195,6 |
| | Windsnelheid op 10 m hoogte [m/s] | 5,1 | 2,2 | 3,0 | 3,8 | 2,4 | 3,0 | 7,0 | 2,8 | 2,1 | 3,1 | 4,9 |
| | Managementgegevens | Bezettingsgraad | 103 | 105 | 105 | 104 | 100 | 98 | 87 | 101 | 91 | 93 |
| Melkgevende geiten | | 930 | 948 | 945 | 935 | 888 | 884 | 784 | 913 | 823 | 833 | 833 |
| Bokken | | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Opfoklammeren | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Melkproductie [kg/dier/dag] | | 2,7 | 3,4 | 3,6 | 3,5 | 3,1 | 2,6 | 2,7 | 2,9 | 3,7 | 3,5 | 3,5 |
| Melk [% eiwit] | | 3,7 | 3,4 | 3,3 | 3,3 | 3,6 | 3,8 | 3,9 | 3,6 | 3,4 | 3,5 | 3,5 |
| Melk [% vet] | | 4,8 | 4,2 | 3,3 | 3,6 | 4,2 | 4,7 | 4,6 | 4,5 | 4,1 | 4,0 | 4,0 |
| Ureumgehalte [mg/100g] | | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 18 | 22 | 32 | 31 | 31 |

Tabel G2.5 Data waarop referentiemetingen zijn uitgevoerd en meetresultaten (ventilatie-debiet, concentraties en emissies) tijdens de referentiemetingen.

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|---|----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Datum | 5-3-2019 | 30-4-2019 | 24-6-2019 | 14-8-2019 | 21-10-2019 | 25-11-2019 | 17-2-2020 | 30-3-2020 | 22-6-2020 | 10-8-2020 | 5-10-2020 |
| Dag in het jaar | 64 | 120 | 175 | 226 | 294 | 329 | 48 | 90 | 174 | 223 | 279 |
| CO ₂ stal [ppm] | 1401 | 1066 | 603 | 878 | 967 | 1245 | 1136 | 1152 | 816 | 537 | 901 |
| CO ₂ ingaand [ppm] | 502 | 529 | 478 | 513 | 502 | 531 | 476 | 473 | 515 | 450 | 479 |
| CO ₂ -productie uit de pot [g CO ₂ /m ² /uur] | 23,6 | 23,4 | 36,1 | 31,1 | 31,4 | 21,1 | 33,3 | 23,2 | 28,0 | 34,3 | 35,7 |
| Debiet [m ³ /dier/uur] | 59 | 92 | 437 | 149 | 116 | 69 | 94 | 77 | 184 | 671 | 151 |
| NH ₃ stal [ppm] | 9,5 | 7,0 | 1,2 | 4,4 | 6,0 | 7,5 | 4,2 | 3,8 | 3,8 | 1,5 | 6,3 |
| NH ₃ ingaand [ppm] | 0,26 | 0,44 | 0,23 | 0,51 | 0,32 | 0,46 | 0,12 | 0,13 | 0,47 | 0,06 | 0,33 |
| NH ₃ emissie [kg/dpl/jaar] | 3,5 | 4,0 | 2,7 | 3,7 | 4,2 | 3,0 | 2,2 | 1,9 | 3,5 | 5,3 | 5,2 |
| CH ₄ stal [ppm] | 109,2 | 55,5 | 19,4 | 34,4 | 39,7 | 63,1 | 58,6 | 44,2 | 23,6 | 10,7 | 34,7 |
| CH ₄ ingaand [ppm] | 5,7 | 5,3 | 3,6 | 6,5 | 4,9 | 4,5 | 3,9 | 2,9 | 4,7 | 2,2 | 4,9 |
| CH ₄ emissie [kg/dpl/jaar] | 37,3 | 29,2 | 41,6 | 25,5 | 24,3 | 23,7 | 27,1 | 20,0 | 18,8 | 30,2 | 24,4 |
| N ₂ O stal [ppm] | 0,30 | 0,35 | 0,41 | 0,43 | 0,45 | 0,61 | 0,38 | 0,36 | 0,45 | 0,65 | 0,28 |
| N ₂ O ingaand [ppm] | 0,28 | 0,33 | 0,39 | 0,38 | 0,43 | 0,58 | 0,36 | 0,33 | 0,44 | 0,63 | 0,28 |
| N ₂ O emissie [kg/dpl/jaar] | 0,03 | 0,03 | 0,16 | 0,12 | 0,03 | 0,04 | 0,03 | 0,04 | 0,04 | 0,22 | 0,01 |

Bijlage 2 Meetapparatuur

B.2.1. Continue metingen (concentraties)

Het instrument dat tijdens dit onderzoek door WLR is gebruikt om de NH_3 -concentraties in stallen continue te monitoren (Figuur B2.1) is gebaseerd op de diffusie van lucht door een membraan in de vloeibare elektrolytoplossing van een elektrochemische sensor (Dräger Polytron 8000 met de FL-6813260 sensor). In deze elektrolytoplossing is een aantal elektroden geplaatst. In de elektrolytoplossing vindt een chemische omzetting plaats. De omvang van deze omzetting is een maatstaf voor de hoeveelheid aanwezig NH_3 in het luchtmonster. De prestatiekenmerken van dit instrument in het lab en onder praktijkomstandigheden zijn door respectievelijk Melse e.a. (2016) en Mosquera e.a. (2017b) beschreven.



Figuur B2.1 Dräger Polytron 8000 met de FL-6813260 sensor voor NH_3 -concentratie metingen.

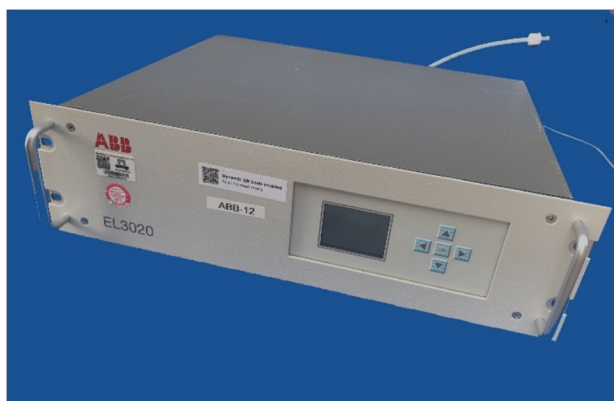
Voor het meten van de CO_2 -concentraties in stallen is in dit onderzoek door WLR gebruik gemaakt van een passieve *Non-dispersive infrared* (NDIR)-sensor (Figuur B2.2; Vaisala CARBOCAP® met GMP252 sensor; <https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/GMP252-User-Guide-in-English-M211897EN.pdf>). Het meetprincipe van dit instrument is gebaseerd op de absorptie van infrarood licht door gasmoleculen. Het instrument vergelijkt twee verschillende signalen: 1) door het luchtmonster bloot te stellen aan infrarood licht met een golflengte die door CO_2 wordt geabsorbeerd, en 2) door een golflengte te gebruiken die niet door CO_2 wordt geabsorbeerd. De verhouding tussen deze twee signalen wordt dan gebruikt om de CO_2 -concentratie in het luchtmonster te bepalen.



Figuur B2.2 Vaisala CARBOCAP® met GMP252 sensor voor CO_2 -concentratie metingen.

Voor het meten van de CH_4 -concentraties in stallen wordt in dit onderzoek door WLR gebruik gemaakt van een NDIR-monitor (Figuur B2.3; ABB EasyLine EL3000 met Uras26 sensor; <https://library.e.abb.com/public/359441019c18638cc1257b0c00546b88/10-24-410-09-EN.pdf>). Zoals hierboven aangegeven maakt NDIR gebruik van de eigenschap van gasmoleculen om infrarood licht te absorberen. Ook hier worden twee signalen met elkaar vergeleken (een door het luchtmonster bloot te stellen aan infrarood licht in een golflengte die door CH_4 wordt geabsorbeerd, en een tweede door

hetzelfde infrarood licht door een referentie cel (gevuld met een gas die het infrarood licht niet absorbeert zoals N₂) te laten passeren) om de CH₄-concentratie in het luchtmonster te bepalen.



Figuur B2.3 ABB EasyLine EL3000 met Uras26 sensor voor CH₄-concentratie metingen.

B.2.2 NH₃-Referentiemetingen: Natchemisch met wasflessen en impingers

Deze methode wordt uitgebreid in Mosquera e.a. (2019) beschreven. Bij de nat-chemische methode wordt de lucht via een monsternameleiding met een constante luchtstroom (tussen 0,5-1,0 l/min) aangezogen met behulp van een pomp (Thomas Industries Inc., model 607CD32, Wabasha, Minnesota, VS) en een kritische capillair die een luchtstroom geeft van ~1,0 l/min. Alle lucht wordt door een impinger (geplaatst in een wasfles met 100 ml 0,05 M salpeterzuur) geleid, waarbij de NH₃ wordt opgevangen. Om rekening te houden met eventuele doorslag wordt een tweede fles in serie geplaatst. Om doorslag naar de pomp te voorkomen wordt de lucht na de impingers met zuur door een vochtvanger (impinger zonder vloeistof) geleid (zie foto hieronder). Na de bemonsteringstijd wordt de concentratie gebonden NH₃ spectrofotometrisch bepaald. Voor en na de meting werd de exacte luchtstroom bepaald met behulp van een flowmeter (Defender 510-m, Bios Int. Corp, USA; zie foto hieronder). Door de bemonsteringsduur, de bemonsteringsflow, het NH₄⁺ gehalte en de hoeveelheid opvangvloeistof te verrekenen kan de NH₃-concentratie in de bemonsterde lucht worden bepaald.



Figuur B2.4 Meetopstelling WLR voor NH₃-referentiemetingen. Links: wasflessen. Midden: Droge gasstroommeter (DryCal® Defender 510-m, Bios Int. Corp, VS). Rechts: pomp (Thomas Industries Inc., model 607CD32, Wabasha, Minnesota, VS), monsternameleiding (teflon of polyethyleen) en kritische openingen (borosilicaatglas (diameter: 8 mm; lengte: 80 mm), gehuisvest in a roestvrijstaal container voor bescherming).

B.2.3 Referentiemetingen voor CO₂, CH₄ en N₂O: Longmethode

Deze methode wordt uitgebreid in Mosquera e.a. (2020) beschreven. Bij de toepassing van de longmethode wordt eerst een 40 liter Nalophan monsterzak in een gesloten vat geplaatst. Door lucht uit het vat met behulp van een pomp (Thomas Industries Inc., model 607CD32, Wabasha, Minnesota, VS) via een teflon/PE-slang te zuigen, ontstaat in het vat onderdruk en wordt de te bemonsteren lucht aangezogen in de zak.

Bij de bepaling van de concentratie broeikasgassen (CO₂, CH₄ en N₂O) wordt de monsterzak gedurende 24 uur continu gevuld met een vaste luchtstroom van 0,02 l/min. Op deze wijze wordt een 24-uurs monster verkregen. Het gehalte aan broeikasgassen in het monster wordt in het laboratorium

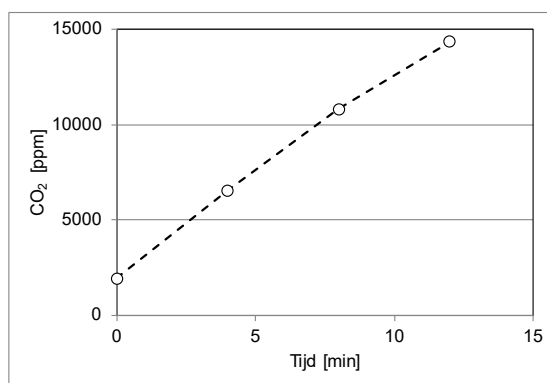
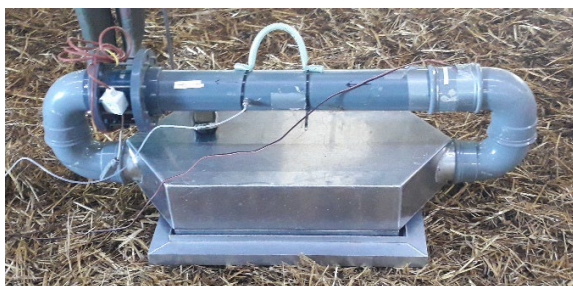
van Wageningen Livestock Research (WLR) met een gaschromatograaf (Interscience, Thermo Trace 1300 GC; kolom: Haysep Q; detector: CH₄: FID, N₂O: ECD, CO₂: TCD) bepaald.



Figuur B2.5 Meetopstelling WLR voor broeikasgas-referentiemetingen (via longmethode). Gesloten vaten met 40 liter Nalophan monsternazakken voor luchtbemonstering, monsternameleiding (teflon of polyethyleen) en kritische openingen (borosilicaatglas (binnendiameter: 8 mm; lengte: 80 mm), ondergebracht in een roestvrijstalen container voor bescherming; flow: ~ 20 ml/min). Lucht wordt met behulp van een pomp (Thomas Industries Inc., model 617CD32, Wabasha, Minnesota, VS) uit het vat gezogen, waardoor de lucht in de zakken wordt aangezogen.

B.2.4 Boxmetingen

Voor de boxmetingen werd een fluxkamer van roestvrij staal gebruikt (Figuur B2.6). De kamer had een oppervlakte van 41 x 61 cm (0,250 m²), en een inhoud van 0,068 m³. Om een goed gemengde recirculatieluchtstroom over het gemeten gebied te creëren, werd een ventilator geplaatst in de PVC-buis die inlaat en uitlaat verbindt. Via een PE-slang (1/4") zijn gasmonsters uit de recirculatieluchtstroom genomen. Op elke plek (boxmeting) werden minimaal 4 gasconcentratiemetingen uitgevoerd nadat de kamer op de pot was geplaatst, om de toename in CO₂-concentratie te kunnen bepalen. Gasconcentraties werden elke 2 tot 4 minuten gemeten. Na elke boxmeting werd de fluxkamer enkele minuten geopend voordat de kamer naar een andere plek in de pot werd verplaatst.



Figuur B2.6 Boxmetingen bij geitenstallen om de CO₂-productie uit de pot te bepalen. Links: meetopstelling. Rechts: voorbeeld van toename in CO₂-concentratie

Gasconcentraties werden gemeten met behulp van een fotoakoestische gasmonitor (Innova 1312; LumaSense Technologies, Ballerup, Denemarken; Figuur B2.7). De meetprincipe van dit instrument is gebaseerd op het effect van infrarood licht op gassen. Als een gas wordt blootgesteld aan infrarood licht met een golflengte die dat gas absorbeert zal een deel van het licht worden geabsorbeerd. Als gevolg hiervan krijgt een aantal moleculen een hoger energieniveau wat leidt tot een stijging van temperatuur en druk. Valt het infrarood licht weg dan zullen de moleculen weer terugvallen naar hun

oorspronkelijke energieniveau, temperatuur en druk zullen weer dalen. Wanneer een gas pulserend wordt belicht ontstaat een steeds wisselend druk die resulteert in een geluidsgolf die met behulp van microfoons kan worden gedetecteerd. De concentratie van het gas in een monster wordt dan door de sterkte van het signaal bepaald.



Figuur B2.7
Innova 1312 voor het meten van de CO₂-concentraties bij de boxmetingen.

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.

